

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NANOAMPÉRMETR S GALVANICKÝM ODDĚLENÍM

NANO-AMMETER WITH GALVANIC ISOLATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Šimka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Marek Šimka

ID: 195444

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Nanoampérmetr s galvanickým oddělením

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte schéma zapojení nanoampérmetru s číslicovým výstupem pro měřicí rozsahy 2, 20 a 200 nA s rozlišením v řádu jednotek pA. Měření musí být realizováno s plovoucím potenciálem maximálně 100V. Napájení může být stejnosměrným zdrojem nebo baterií, ale v takovém případě by zařízení mělo být schopno pracovat několik dní. Předpokládejte komunikaci nanoampérmetru pomocí světlovodů. Při návrhu se zaměřte na rozbor možných chyb měření a jejich eliminaci.

Navrhněte desku plošného spoje s ohledem na celkovou velikost přístroje. Zařízení realizujte, oživte a proveďte ověření dosažených parametrů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Low Level Measurements Handbook [online]. 7th Edition. USA: Tektronix, 2016 [cit. 4.9.2018]. Dostupné z: http://download.tek.com/document/LowLevelHandbook_7Ed.pdf

[2] HOROWITZ, P., HILL, W. The Art of Electronics. New York: Cambridge University Press, 2015.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 23.5.2019

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá všemi aspekty, které jsou důležité při návrhu nanoampérmetru. V teoretické části jsou proto vysvětleny možné způsoby, jak měřit elektrický proud velmi nízkých hodnot. Další body popisují všechny parametry ovlivňující přesnost měření. To jsou nežádoucí a svodové proudy, ale také další parazitní jevy, které mohou nastat. Práce vysvětluje, jak minimalizovat nežádoucí proudy a další vlivy. V praktické sekci je detailnější popis navrženého hlavního schéma zapojení. Jsou zde také specifikované komponenty, které byly vybrány jako hlavní části obvodu nanoampérmetru. Následující část obsahuje rozbor desky plošných spojů včetně všech vrstev. Práce se dále zabývá realizací zařízení a případnými chybami. Poslední kapitola shrnuje výsledky bakalářské práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Měření nízkých proudů, Izolační materiály, Galvanické oddělení, Svodové proudy, Triboelektrický efekt, Piezoelektrický jev, Dielektrická absorbce, Posun nulové úrovně, Mikrokontrolér, Deska plošných spojů

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with all the aspects, that are important in the designing of the nano-ammeter. In theoretical part, there are described possible ways to measure electrical current of very low values. Other parts of the thesis describe all parameters, which are influencing measurement accuracy. These are, for example, unwanted and leakage currents, but also other parasitic phenomena that may occur. Thesis explains how to minimize unwanted currents and other influences. Practical section provides more detailed description of the proposed main scheme. There are also described components, that have been selected as the main parts of the nano-ammeter circuit. Subsequent part contains analysis of printed circuit board including all layers. Furthermore, the thesis deals with the realization of equipment and possible errors. The results of the bachelor are summarized in the last chapter.

KEYWORDS

Measurement low currents, Insulating materials, Galvanic isolation, Leakage currents, Triboelectric effect, Piezoelectric effect, Dielectric adsorption, Zero drift, Microcontroller, Printed circuit board

ŠIMKA, Marek. *Nanoampérmetr s galvanickým oddělením*. Brno, 2019, 60 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Nanoampérmetr s galvanickým oddělením“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Ing. Jaromíru Hustákovi za ochotu, konzultace a odborné rady. Poděkování patří také vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zdeňku Kolkovi za podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	10
1 Měření nízkých el. proudů	11
1.1 Ampérmetr s odporovým bočníkem	12
1.2 Ampérmetr se zpětnou vazbou	13
1.3 Logaritmický ampérmetr	14
2 Rušivé jevy a nežádoucí proudy	15
2.1 Svodové proudy	15
2.2 Posun nulové úrovně	15
2.3 Klidový proud	16
2.4 Parazitní jevy izolačních materiálů	16
2.4.1 Piezoelektrický jev	16
2.4.2 Triboelektrický efekt	17
2.4.3 Dielektrická absorpce	18
2.5 Vlivy znečištění a vlhkosti	18
3 Potlačení nežádoucích vlivů	20
3.1 Izolační materiály	20
3.2 Stínění a ochrana zařízení	22
4 Galvanické oddělení	24
4.1 Oddělení pomocí relé	24
4.2 Optoelektronické oddělení	24
4.3 Oddělovací transformátory	26
5 Návrh schéma zapojení nanoampérmetru	27
5.1 Hlavní komponenty	28
5.2 Rozbor a popis schéma zapojení	31
5.3 Možné chyby měření	40
6 Deska plošných spojů	44
7 Oživení zařízení	46
7.1 Ověření dosažených parametrů	46
7.2 Programové vybavení	49
8 Závěr	50

Literatura	51
A Přílohy	53
A.1 Schéma zapojení	53
A.2 Deska plošných spojů	56
A.3 Seznam použitých součástek	58

Seznam obrázků

1.1	Náhradní schéma zatíženého obvodu ampérmetrem	11
1.2	Boční ampérmetr	12
1.3	Zpětnovazební ampérmetr	13
1.4	Logaritmický ampérmetr se zpětnovazební diodou	14
1.5	Logaritmický ampérmetr s tranzistorem	14
2.1	Piezoelektrický efekt při působení vnější síly na materiál	17
2.2	Triboelektrický efekt koaxiálního kabelu	17
2.3	Elektrochemický efekt na DPS	19
3.1	Obvod nechráněné ionizační komory	22
3.2	Obvod chráněné ionizační komory	23
4.1	Struktura oddělovacího optronu	25
4.2	Schéma optronu s tranzistorem v Darlingtonově zapojení	25
4.3	Oddělovací transformátor	26
4.4	Blokové schéma transformátoru s modulací	26
5.1	Zjednodušené zapojení Vstupního dílu	27
5.2	Zapojení operačního zesilovače	32
5.3	Zapojení dvojice relé pro rozsah 200n	35
5.4	Zapojení optočlenů	36
5.5	Zapojení měniče	37
5.6	Zapojení stabilizátorů	38
5.7	Zapojení mikrokontroléru	39
5.8	Teplotní závislost svodového proudu (I_{GSS}) tranzistoru BF545	42
5.9	Změna výstupního napětí v závislosti na teplotě stabilizátoru LT1086CT	42
6.1	Detail stínění na DPS	45
7.1	Osazená DPS.	46
7.2	Zapojení pracoviště pro měření parametrů	47
7.3	Závislost odchylky měření na vstupním proudu pro rozsah 200nA	48
7.4	Vývojový diagram programu	49
A.1	Schéma zapojení - Mikrokontrolér	53
A.2	Schéma zapojení - Vstupní díl	54
A.3	Schéma zapojení - Napájecí obvody	55
A.4	První vrstva (Top) DPS	56
A.5	Druhá vrstva DPS	56
A.6	Třetí vrstva DPS	57
A.7	Čtvrtá vrstva (Bottom) DPS	57

Seznam tabulek

3.1	Srovnání izolačních materiálů podle vlastností	21
5.1	Parametry operačního zesilovače TLC271ACD	28
5.2	Technické parametry mikrokontroléru C8051F352	30
5.3	Srovnání možných chyb a jejich odchylek měření vzhledem k rozsahu 2nA	43
6.1	Parametry desky plošných spojů	44
7.1	Výstupní napětí při zvýšené teplotě prostředí (rozsah 200nA)	48

Úvod

Cílem práce byl návrh zapojení a desky plošných spojů nanoampérmetru, který je koncipován pro požadované měřicí rozsahy 2, 20 a 200nA. Konkrétně se jedná o schéma zapojení pro zařízení s rozlišením jednotek pA, jenž bude komunikovat pomocí světlovodů a bude mít galvanicky oddělený zemní potenciál. Napájení mělo být zvoleno pomocí zdroje nebo baterie. Požadovaný cíl práce bylo také oživení a ověření dosažených parametrů výsledného zařízení.

První čtyři kapitoly slouží jako teoretický rozbor problematiky měření nízkých proudů včetně možných chyb měření. Postupně jsou v práci vysvětleny možné varianty principiálních zapojení ampérmetrů pro měření elektrického proudu o nízkých hodnotách. Jedná se o tři různá zapojení obvodů, které slouží jako základ při návrhu komplexního měřicího zařízení. Další část pojednává o nežádoucích proudech jako jsou svodové proudy, klidový proud nebo posun nulové úrovně ampérmetru. V této kapitole je úsek věnovaný parazitním jevům materiálů. V práci se nachází popsání možnosti, jak minimalizovat nežádoucí proudy a další vlivy pro dosažení požadované přesnosti měření. Způsoby galvanického oddělení se nachází ve čtvrté kapitole. Pátou kapitolou začíná hlavní část bakalářské práce jako je samotný popis návrhu zapojení nanoampérmetru, výběr hlavních součástí a v neposlední řadě případné chyby měření, které hrozí v konkrétních případech. Navazující kapitola pojednává o tvorbě desky plošných spojů. Oživení a ověření parametrů zařízení včetně stěžejních poznatků práce shrnuje závěrečná kapitola, která obsahuje i podkapitolu věnovanou vývojovému diagramu demonstrující případný průběh programu pro obsluhu zařízení.

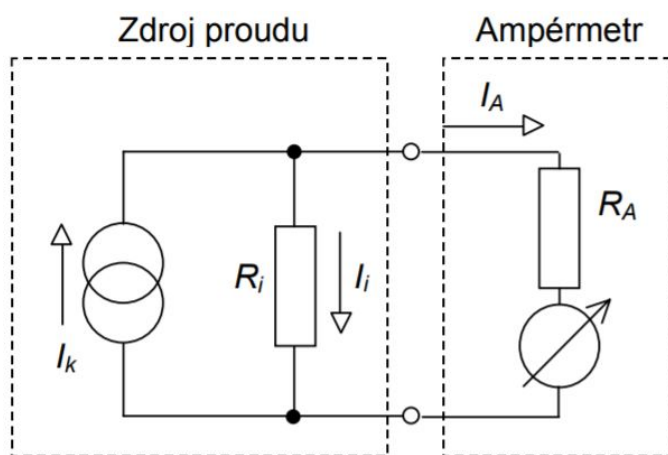
1 Měření nízkých el. proudů

Ampérmetr

Ampérmetrem se z technického hlediska rozumí takové zařízení, jenž slouží k měření velikosti protékajícího elektrického proudu. Název konkrétního přístroje měřící proud bývá obvykle odvozen od jeho měřícího rozsahu, tzn. měří-li přístroj proud například v rozsahu jednotek nebo stovek nanoampér, potom ho můžeme nazvat Nanoampérmetrem.

Ampérmetr jako měřící přístroj musí být při měření bezpodmínečně v sériovém zapojení (tzn. za sebou) s měřeným obvodem, aby mohl měřit proud protékající danou větví obvodu. Základní vlastností je jeho malý vstupní odpor (impedance). Při pojení ampérmetru do obvodu změním původní hodnotu protékajícího proudu, neboť vstupní odpor ampérmetru není nulový, jak by bylo ideální. Pokud nelze vstupní odpor ampérmetru vůči odporu měřeného obvodu zanedbat, proud tekoucí obvodem se vložením ampérmetru do obvodu změní, neboť přístroj vytvoří úbytek napětí. Musíme vzít v potaz odchylku, která udává rozdíl hodnoty proudu změřeného ampérmetrem a původní hodnotou proudu procházející samotným obvodem [1].

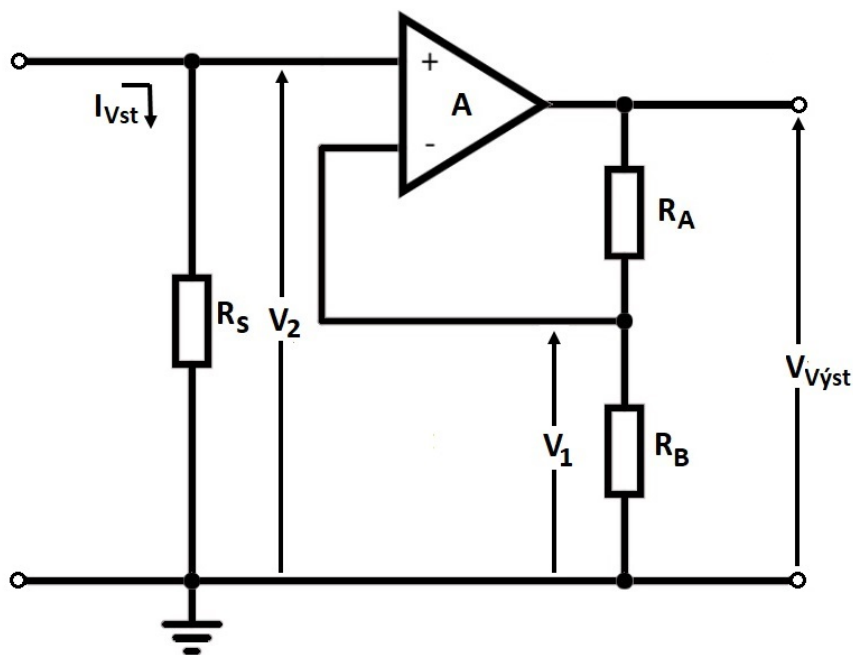
Náhradní schéma obvodu při zatížení ampérmetrem ukazuje Obrázek 1.1, kde (R_A) představuje vstupní odpor ampérmetru, (R_i) vyjadřuje odpor a (I_k) proud zdroje. Právě z důvodu, aby nedošlo k velkému ovlivnění přesnosti je dosažení nízkého vstupního odporu při měření malých proudů, jako jsou například jednotky nanoampér nebo pikoampér, velmi významným parametrem.



Obr. 1.1: Náhradní schéma zatíženého obvodu ampérmetrem podle [2].

1.1 Ampérmetr s odporovým bočníkem

Základem ampérmetru je operační zesilovač (A), sloužící jako zesilovač napětí. Zapojení celého obvodu je na Obrázku 1.2. Vstupní měřený proud prochází přes rezistor (R_S), což představuje odporový bočník. Napětí na tomto rezistoru je zesilovačem zesíleno a na výstupu změřeno. Výstupní napětí bude dáno dle rovnice (1.1).



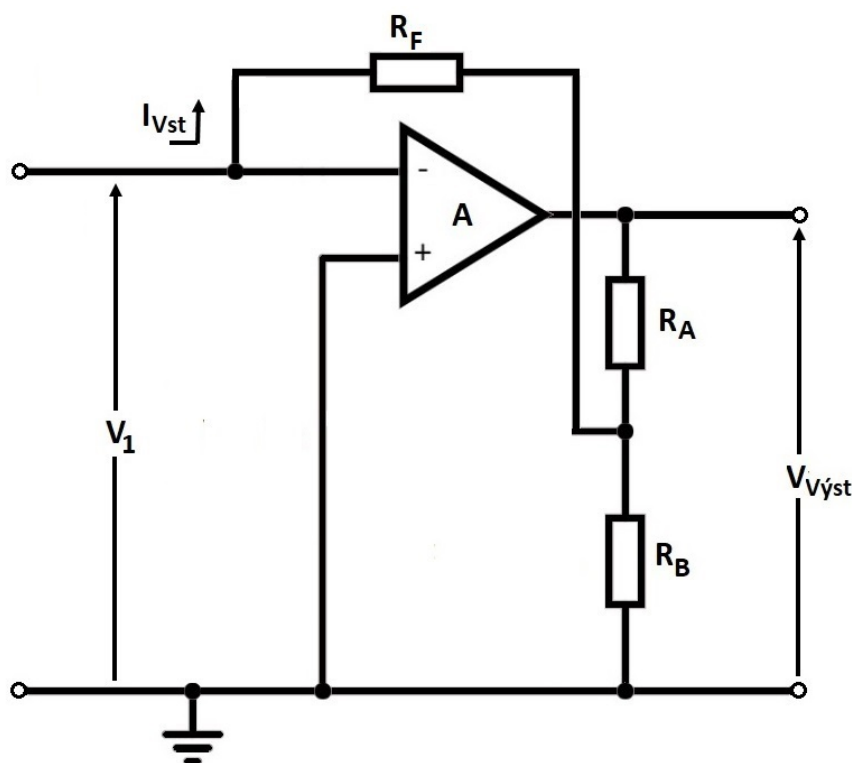
Obr. 1.2: Boční ampérmetr. Převzato a upraveno dle [3].

$$U_{V_{\text{ýst}}} = I_{V_{\text{st}}} R_S \left(1 + \frac{R_A}{R_B} \right) \quad (1.1)$$

Hodnotu rezistoru (R_S) bychom měli obecně volit nejmenší možnou. Hlavní důvody této volby jsou kvůli lepším parametrům rezistoru. Při malých hodnotách odporu dosahují rezistory výraznější časové a teplotní stability, lepšího napěťového součinitele a nižší tolerance jmenovité hodnoty. Kromě lepších parametrů součástky je také výhodou rychlejší odezva zařízení, než při aplikaci rezistoru s vyšší hodnotou. V takovém případě bude i napěťové zatížení měřícího obvodu menší, avšak může dojít ke snížení poměru signál-šum [3].

1.2 Ampérmetr se zpětnou vazbou

Tento typ ampérmetru využívá zpětné vazby operačního zesilovače tvořenou rezistorem (R_F). Na vstupu obvodu není žádný paralelně připojený rezistor, nýbrž pouze přítomný operační zesilovač (A). Ten svým vysokým ziskem způsobí, že napětí (U_1) se blíží nule a tím dochází pouze k malému napětovému zatížení. Rezistory (R_A) a (R_B) jsou zapojeny jako dělič napětí, tudíž slouží ke změně velikosti výstupního napětí. Výsledná hodnota výstupního napětí je pak dána vztahem (1.2), kde znaménko mínus na pravé straně rovnice značí, že se jedná o invertující zapojení zesilovače (obrací fázi o 180°). [3]

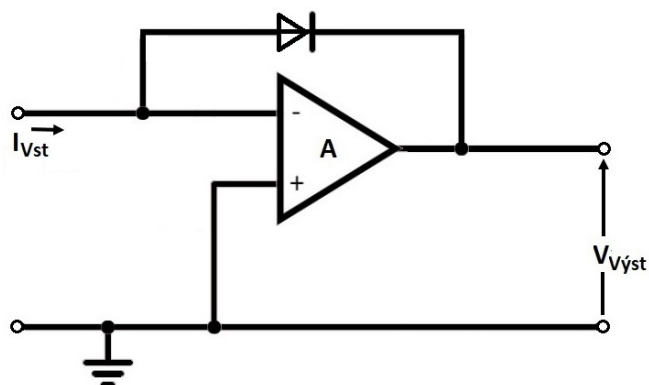


Obr. 1.3: Zpětnovazební ampérmetr. Převzato a upraveno dle [3].

$$U_{Vyst} = -I_{Vst} R_F \left(1 + \frac{R_A}{R_B} + \frac{R_A}{R_F} \right) \quad (1.2)$$

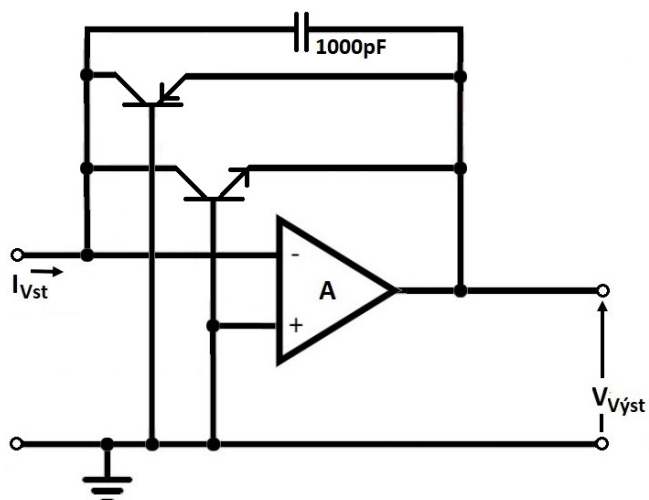
1.3 Logaritmický ampérmetr

Logaritmický ampérmetr vznikne nahrazením zpětnovazebního rezistoru diodou (Obrázek 1.4) nebo také tranzistorem, vyznačující se logaritmickým průběhem voltampérové charakteristiky (závislost proudu na napětí). V určité oblasti převodní charakteristiky diody je potom výstupní napětí závislé na měřeném proudu logaritmicky. Tento typ závislosti umožňuje měření ve větším rozpětí hodnot proudu při stále stejném rozsahu. Avšak nevýhodou je ztráta přesnosti a rozlišení.



Obr. 1.4: Logaritmický ampérmetr se zpětnovazební diodou. Převzato a upraveno dle [3].

Výkonější a využívanější zapojení je pomocí tranzistorů (Obrázek 1.5), kde je jeden NPN a druhý PNP tranzistor ve zpětné vazbě, což umožňuje měřit proud obou polarit neboli proud střídavý [3].



Obr. 1.5: Logaritmický ampérmetr s tranzistory. Převzato a upraveno dle [3].

2 Rušivé jevy a nežádoucí proudy

Pokud uvažujeme měřicí přístroj v rozsahu nízkých hodnot proudu, tak musíme brát v úvahu možné zdroje parazitních proudů ovlivňující přesnost měření. Nejčastěji vyskytující se nežádoucí proudy jsou specifikovány a vysvětleny v následujících podkapitolách.

2.1 Svodové proudy

Svodový proud je označení pro parazitní proud, který vzniká cestami mezi měřeným obvodem a zdrojem napětí. Tento nežádoucí proud způsobí snížení přesnosti měření především u nízkých hodnot proudu. V situacích, kdy je impedance zkoušeného zařízení srovnatelná s impedancí testovacího zařízení, tak lze tyto nežádoucí proudy očekávat, neboť není splněn předpoklad, že testovací zařízení má vyšší hodnotu impedance než zařízení testované.

Způsoby, jak minimalizovat vznik a vliv svodových proudů, jsou především využití kvalitních materiálů s dobrými izolačními vlastnostmi. Testovací prostředí by nemělo mít vysokou úroveň relativní vlhkosti a také je nezbytné použít stínění na všech rizikových částech přístroje. Pokud zvažujeme výběr materiálu na izolaci, tak bychom se měli rozhodně vyhnout fenolu a nylonu [3].

2.2 Posun nulové úrovně

Posun nuly (Zero drift) lze chápat jako kolísání nulové hodnoty samotného zařízení. Jedná se tedy o chybu, která se objevuje na vstupu a tím přímo dochází ke zkreslení vstupního signálu, což způsobí odchylku měření. Kolísání nulové úrovně je obvykle definované v závislosti na čase či teplotě. Zajímá nás tedy, jak se nulová hodnota posouvá v určitém časovém intervalu a v teplotním rozsahu. Hlavní důvod této chyby bývá totiž vliv teploty, respektive zahřívání součástek. To se týká pasivních součástek a především operačních zesilovačů či jiných citlivých integrovaných obvodů. Parametry takových součástek se s rostoucí teplotou negativně mění a při vysokých teplotách (např. 100°C a více) dosahují výrazných odchylek jmenovitých vlastností.

V měřicím prostředí, nacházející se při pokojové teplotě, jsou obvyklé změny teploty například 1°C za 15 minut. Z toho plyne, že pokud neprobíhá časově dlouhé měření (jednotky hodin) nebo nedochází k prudkému zahřívání prostředí, tak se tyto změny na parametrech komponentů významně neprojeví. Pro opačné situace obsahují některé přístroje opatření proti posunu nuly. Většinou je řešení realizováno

pomocí zesilovače, který změnou vnitřního offsetu ovlivní nulovou úroveň zařízení. Avšak vliv teplotních změn je nutné posuzovat pro konkrétní součástky individuálně. [3].

2.3 Klidový proud

Samotný ampérmetr také vykazuje vlastní chybu. Pokud není připojený žádný vstupní proud, tak v ideálním případě očekáváme, že naměřená hodnota ampérmetrem bude činit nulu. Reálně je však situace jiná a musíme počítat s odchylkou přístroje, protože naměříme nízký nežádoucí proud, který není tvořen pouze jedním hlavním zdrojem.

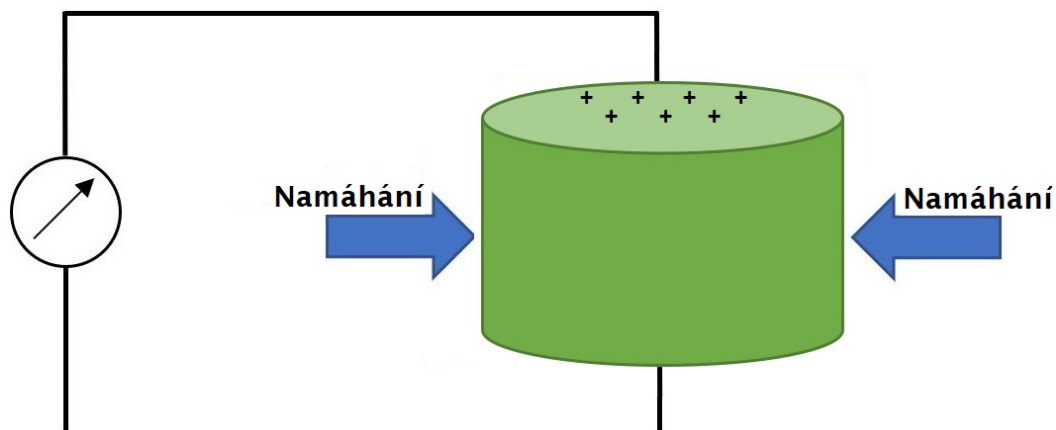
Na vzniku tohoto proudu se totiž podílí například parazitní proudy aktivních součástek (operační zesilovač apod.) v klidovém režimu, proudy svodové anebo pronikající přes izolaci z okolí. Také vliv času a teploty může ovlivnit součástky a následně způsobit nežádoucí proud. Výsledná hodnota naměřená přístrojem je dána součtem proudu vstupního/měřeného a klidového proudu samotného ampérmetru. Pro minimalizování vlivu klidového proudu na přesnost měření je proto důležité přístroj před provedením každého měření zkalibrovat s ohledem na tuto hodnotu proudu [3].

2.4 Parazitní jevy izolačních materiálů

2.4.1 Piezoelektrický jev

Samotný název jevu napovídá, že podstatou je tlakové působení na materiál, neboť výraz *piezo* znamená v řečtině *tlak*. Piezoelektrický efekt vznikne a vygeneruje proud tehdy, pokud jsou molekuly materiálu mechanicky namáhány externí silou. Působením vnější síly dojde k deformaci rovnováhy mezi náboji a z původní neutrální molekuly vzniknou kladné a záporné náboje. Nejčastější hodnoty proudu generovaného namáháním materiálu jsou v případě teflonu jednotky pikoampér (10^{-12} A) a pro keramiku desetiny pikoampér (10^{-13} A) [4].

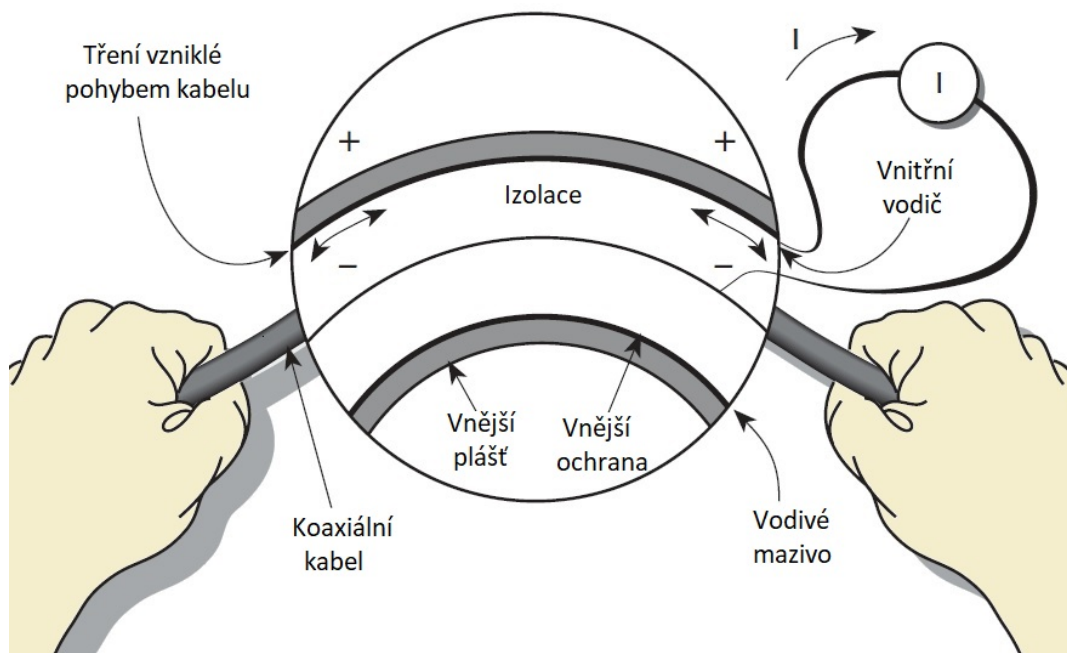
Na obrázku 2.1 je efekt demonstrován na kvádru materiálu, jenž je stlačován vnější silou a poté dochází ke shromáždění nábojů k jedné straně pozitivních a k opačné straně nábojů negativní. Vznik nežádoucích proudů lze minimalizovat, pokud budeme chránit izolant před namáháním jako jsou výraznější ohyby nebo ztísněnost kabelu v částech zařízení. Důležité je samozřejmě použití materiálu, který je netečný vůči piezoelektrickému efektu. V Tabulce 3.1 na straně 21 najdeme materiály, jenž tento požadavek splňují.



Obr. 2.1: Piezoelektrický efekt při působení vnější síly na materiál. Převzato a upraveno dle [5].

2.4.2 Triboelektrický efekt

Triboelektrickým jevem označujeme proces, kdy se třením mezi vodičem a izolantem vytvoří nové náboje. Zde se pak volné elektrony uvolní z vodiče a tím dochází k nerovnováznosti toku proudu. Tento efekt je názorně ukázán na průchodu proudu koaxiálním vedením na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Triboelektrický efekt koaxiálního kabelu. Převzato a upraveno dle [3].

Použitím nízkošumového vedení lze vliv tohoto jevu snížit. Vnitřní izolace je tvořena polyethylenem, která je pokryta vrstvou grafitu. Ten působí jako mazivo a vyrovná a minimalizuje náboje vznikající třením při pohybu kabelu. Ani nízkošumové vedení ale není zcela ideální, takže se může malý šum objevit při ohýbání, chvění nebo při jiném nepřírodném pohybu kabelu. Proto je dobré připevnit všechna vedení a kabely ke sloupkům, stěnám nebo k jiným částem konstrukce zařízení.

Triboelektrický účinek může vyvolat i teplotní změna, která zapříčiní roztažné síly působící na kabel, proto bychom se měli vyvarovat větším výkyvům teplot. Posledním možným zdrojem těchto účinků mohou být navzájem dotýkající se izolace a vodiče. Při využití standardního vedení se pohybují generované proudy triboelektrickým jevem kolem desítek nanoampérů (10^{-8}A), naopak nízkošumový kabel je schopný tento efekt minimalizovat a proudy snížit hluboko pod pikoampéry (10^{-12}A) [3].

2.4.3 Dielektrická absorpce

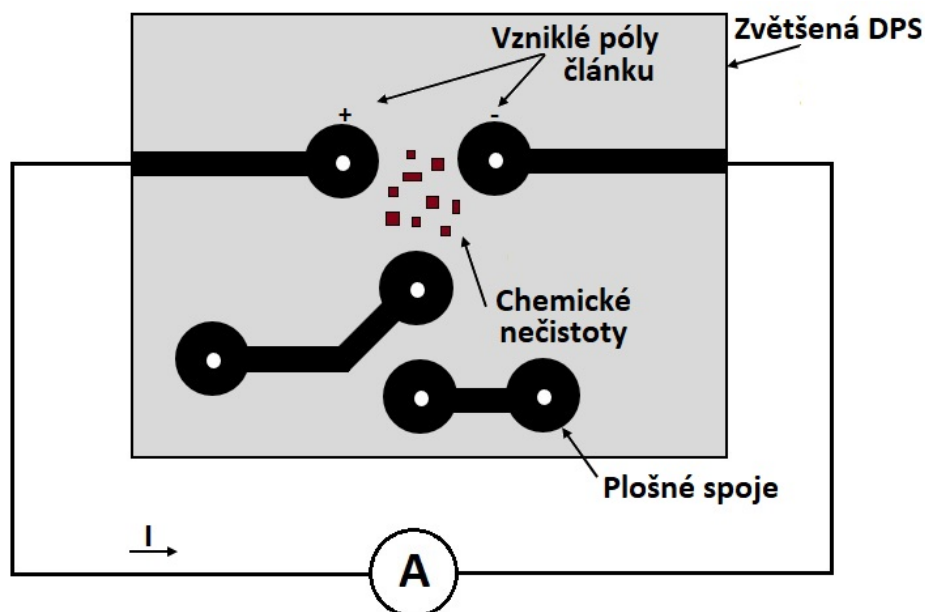
Dielektrická absorpce vzniká tehdy, dojde-li působením připojeného napětí v kabelu k vytvoření elektrického pole, které následně svým působením polarizuje náboje uvnitř izolace. Pokud bychom kabel odpojili od zdroje napětí, tak odtržené částice rekombinují nazpět.

Jev se vyskytuje v izolačním materiálu pouze při využívání napětí o hodnotě několik voltů. V některých případech je ale takové napětí nutné, potom však může trvat desítky až stovky minut, než se proud způsobený absorpcí dielektrika rozptýlí a tím zanikne. Jak se některé materiály chovají při působení elektrického pole najdeme v tabulce 3.1.

2.5 Vlivy znečištění a vlhkosti

Další nežádoucí proudy se mohou objevit díky elektrochemickému efektu, jenž je graficky znázorněn na obrázku 2.3. Typický příklad jsou vodivé cesty na desce plošných spojů (DPS), mezi nimi chemikálie vytvoří elektrochemické články. Tento problém vznikne, pokud není deska dostatečně očištěna od leptacího roztoku, pomocného tavidla nebo jiné další znečištění povrchu. Následně vzniklé chybové proudy mohou nabývat hodnot v řádu jednotek až desítek nanoampérů (10^{-8}A). Oproti tomu lze

při čistém povrchu parazitní proudy zanedbat, neboť v takovém případě proudy nabývají pouze desetin pikoampérů (10^{-13}A).



Obr. 2.3: Elektrochemický efekt na DPS. Převzato a upraveno dle [3].

Zvýšené hodnoty vlhkosti v měřicím prostředí anebo iontové znečištění mají primární dopad v poklesu izolačního odporu. V praxi může třeba kapka lidského potu obsahující sůl způsobit právě iontové znečištění. Kombinace vysoké vlhkosti i iontového znečištění způsobí vodivé cesty, ba dokonce může dojít k vytvoření článku s velkým sériovým odporem.

Je tedy důležité vyhnout se riziku kondenzace vody na elektronických částech zařízení a především dbát na čistotu všech desek obsahující vodivé cesty a také izolantů. Pokud objevíme známky nějakého znečištění, tak nejjednodušeji jej odstraníme pomocí prostředků jako je methanol nebo izopropylalkohol. Čistící látka by měla být maximálně kvalitní, aby nezanechávala na povrchu elektrochemický film [3].

3 Potlačení nežádoucích vlivů

3.1 Izolační materiály

Parazitní proudy můžeme minimalizovat také správným výběrem izolačního materiálu. Při výběru izolace pro naši požadovanou aplikaci musíme zjistit, zda materiál nepodléhá některému z jevů popsaných v předchozí části kapitoly na straně 16. Jednotlivé materiály jsou popsány dle [3] a celkové porovnání podle všech parametrů obsahuje tabulka 3.1. V případě nanoampérmetru je izolační materiál uplatněn v rámci izolace koaxiálního kabelu přivádějící měřený proud. Polyethylen lze aplikovat i na izolování samotných vstupních pinů s připojeným kabelem.

Nejvhodnější izolant je hodnocen podle následujících parametrů:

- **Rezistivita:** schopnost materiálu bránit průchodu proudu
- **Piezoelektrický efekt:** vznik nežádoucích proudů deformací izolace
- **Triboelektrický efekt:** vznik nežádoucích proudů třecími účinky
- **Dielektrická absorpce:** schopnost izolace hromadit/uvolnit náboj
- **Povrchový odpor:** ovlivnění znečištěním povrchu

Safír

Safír je z hlediska vlastností nejkvalitnější izolační materiál, proto se nejčastěji používá pro měření extrémně nízkých hodnot proudu od 10^{-18}A do 10^{-15}A . Oproti teflonu je například odolný vůči piezoelektrickému jevu, neboť při mechanickému namáhání vzniká jen zanedbatelně malý náboj. Širšímu využití brání především vysoké výrobní náklady a také to, že nelze snadno obrábět a tvarovat.

Teflon

Teflon nebo také polytetrafluoretylen je v současnosti nejpoužívanější izolační materiál. Využívá se k izolaci od nízkých hodnot proudů jako je 10^{-14}A . Je také chemicky neutrální, takže jde i snadno čistit a obrábět. Teflon má samozřejmě vysokou hodnotu rezistivity, je odolný vůči vodě, takže se na jeho povrchu nevytvoří žádná souvislá vrstva vody a jeho parametry se nezmění působením vlhkého prostředí. PTFE je typ teflonu, který se v elektronice nejvíce aplikuje. Jedinou podstatnou nevýhodou je, že deformací tohoto materiálu vznikají falešné nežádoucí proudy a napětí. Tato reakce, jenž je způsobena piezoelektrickým efektem, není závažná pokud měříme proudy větší než 10^{-13}A ve standardních podmínkách.

Polystyren

Ve srovnání s teflonem je hlavní předností polystyrenu nízká cena, proto byl dříve využíván mnohem více než nyní. Je snadno opracovatelný, avšak přitom vznikají uvnitř trhliny. Tyto případně vzniklé trhliny nemají vliv na izolační vlastnosti, pokud se nedostanou až na povrch. Negativem polystyrenu je, že se ve vlhkém prostředí tvoří na jeho vnější vrstvě vodní film a tím se změní povrchový odpor.

Polyethylen

Polyethylen vyniká svou vysokou rezistivitou a povrchovými vlastnostmi se podobá polystyrenu. Další jeho výhodou je tvárnost a především pružnost, proto je ve velké míře používán u koaxiálních a triaxiálních vedení. V případě polyethylenu nesmíme zanedbat jeho nízký bod tání, avšak tato nevýhoda nemusí tvořit problémy, aplikujeme-li ho ve správném testovacím prostředí.

Sklo a Keramika

Sklo a keramika stejně jako ostatní zmíněné materiály mají vysokou hodnotu rezistivity. Mají ale také negativa, jako jsou například špatné povrchové vlastnosti ve vlhkém prostředí nebo neodolnost vůči piezoelektrickému efektu. Pro eliminování povrchových nedostatků se často jejich povrch ošetřuje silikonovými laky, které se následně zapékají. Materiály se vyznačují obtížným mechanickým zpracováním, avšak formovatelnost je dobrá.

Tab. 3.1: Srovnání izolačních materiálů dle vlastností [3].

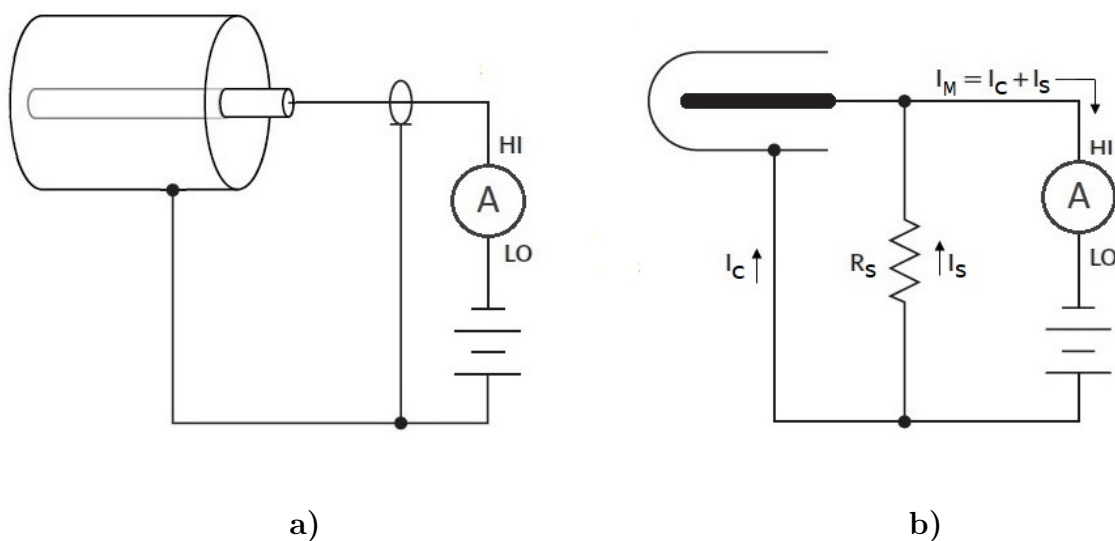
Materiál	Rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Piezoelektrický efekt	Triboelektrický efekt	Dielektrická absorpce
Teflon	$>10^{18}$	-	-	+
Safír	$>10^{18}$	+	0	+
Polyethylen	10^{16}	+	0	+
Polystyren	$>10^{16}$	0	-	+
Sklo	10^{13}	0	-	-
Keramika	$10^{14} - 10^{15}$	0	+	+
Nylon	$10^{13} - 10^{14}$	0	-	-

Pozn.: + Materiál je velmi dobrý v daném parametru
0 Materiál je průměrný v daném parametru
- Materiál je nedostatečný v daném parametru

3.2 Stínění a ochrana zařízení

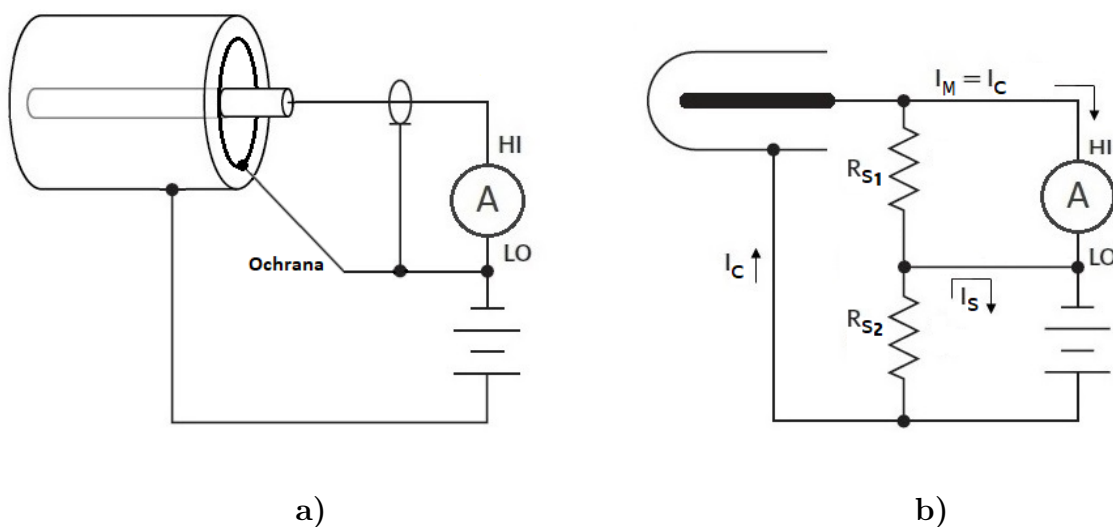
Stínění kabelu z fyzikálního hlediska představuje ochranný obvod kolem vodiče po celé jeho délce, který je spojen v jednom bodě s obvodem o stejném potenciálu s vysokou impedancí. Aplikace stínění, respektive ochrany je základní způsob, jak snížit chybové proudy a konkrétně proudy svodové. Princip stínění je založen na tom, že ochranný obvod rozdělí svodový odpor na dvě části. Obrázky 3.1 a 3.2 ukazují rozdíl v náhradním schématu obvodu při zanedbání stínění a při použití ochrany na příkladu ionizační komory.

Obrázek 3.1 znázorňuje obvod pro měření proudu z ionizační komory a k němu odpovídající náhradní schéma obvodu, kde měřený proud (I_M) je dán součtem proudu z ionizační komory (I_C) a svodového proudu (I_S). Svodový proud vzniká z důvodu přítomnosti téměř celého napětí zdroje na svodovém odporu (R_S), ten je tvořen izolačním odporem komory a koaxiálního kabelu.



Obr. 3.1: **a)** Obvod ionizační komory bez ochrany; **b)** Odpovídající náhradní schéma. Převzato a upraveno dle [3].

Druhý případ, kde se jedná o obvod s použitím kovového ochranného prstence, je na obrázku 3.2. Ochrana rozdělí svodový odpor na dvě části R_{S1} a R_{S2} . Hodnota napětí na R_{S1} je zátěž ampérmetru a většinou nedosahuje ani jednoho milivoltu, takže proud je téměř zanedbatelný. Na odporu R_{S2} je celé napětí zdroje, avšak hodnota svodového proudu se nepromítne do výsledného proudu naměřeného ampérmetrem a nedochází k nepřesnosti měřené hodnoty, neboť svodový proud poteče uzavřenou smyčkou ke zdroji. Kovový prstenec v tomto vzorovém příkladu plní podobnou funkci jako vodivé opletení v izolaci koaxiálního kabelu [3].



Obr. 3.2: **a)** Obvod ionizační komory s ochranným prstencem; **b)** Odpovídající náhradní schéma. Převzato a upraveno dle [3].

4 Galvanické oddělení

U mnoha zařízení obsahující elektroniku je žádoucí mít oddělený hlavní zemní potenciál celého zařízení od ostatních zemí využitých v elektronice. Jednotlivé zemní potenciály proto oddělujeme pomocí tzv. galvanického oddělení, při kterém dochází k přenosu el. energie bez spojení vodičem.

Signál nesoucí informaci je zprostředkován nejčastěji optickým zářením, magnetickým polem a méně často také elektromechanicky. V následující části jsou popsány vybrané druhy galvanického oddělení, nejčastěji aplikovaných v elektronických zařízeních [6].

4.1 Oddělení pomocí relé

Relé s elektromechanickou vazbou

Nejčastější realizace elektromechanického oddělení je pomocí relé, které tvoří primární okruh cívky ovládající kontakty na sekundární straně. Na cívce se vytvoří magnetické pole a to následně přitáhne kontakty na sekundární části relé. Jeho výhodou je dokonalé sepnutí pomocí pevných kontaktů, minimální ztrátový výkon a také mají dlouhou životnost. V určitých elektronických obvodech je však jejich zpoždění, než dojde k vybuzení cívky a sepnutí kontaktů.

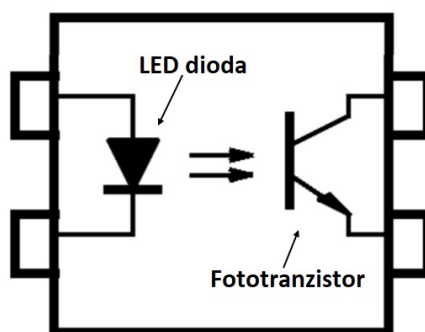
Relé s optickou vazbou

Existují i varianty rychle spínajícího relé, skládající se z optické vazby a tranzistorové spínací části. Optická vazba je tvořena jako u optočlenu LED diodou a sepnutí v sekundární části je realizováno pomocí MOSFET tranzistoru, umožňující rychlé sepnutí, což je jejich hlavní výhoda. Díky spínání pomocí tranzistoru je možné tento typ relé aplikovat i ve vysokofrekvenčních obvodech [9].

4.2 Optoelektronické oddělení

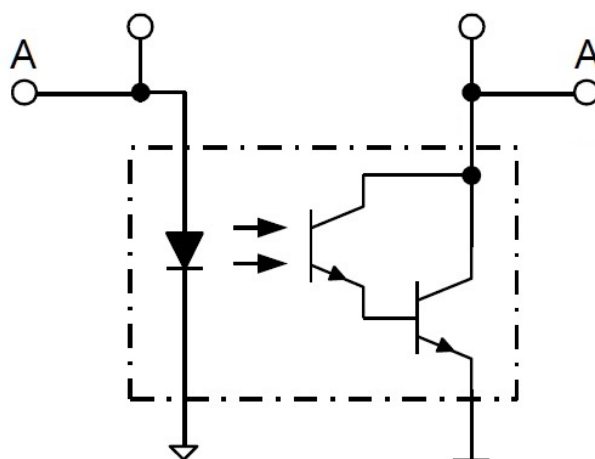
První přenosová vazba, jenž lze použít k realizaci galvanického oddělení, je optoelektronický člen, což nejčastěji představuje optron, respektive optočlen. Takový vazební člen se skládá z LED diody (zdroj vysílaného světelného signálu) a fototranzistoru, případně fotodiody (příjemce zpracovávající světelný signál). Přenos mezi nimi probíhá pomocí optického signálu.

Optický spoj je odolný proti vnějšímu rušení a také u něj nedochází ke zpětným vazbám. Zjednodušeně vyjádřené složení optronu je na obrázku 4.1. Lehce se realizuje přenos impulsových signálů, avšak analogové signály se touto cestou přenášejí obtížně v důsledku značné nelinearity členů. Firmy nabízejí různé typy optočlenů pro různé hodnoty kolektorových proudů a napětí mezi kolektorem a emitorem fototranzistoru.



Obr. 4.1: Struktura oddělovacího optronu. Převzato a upraveno dle [7].

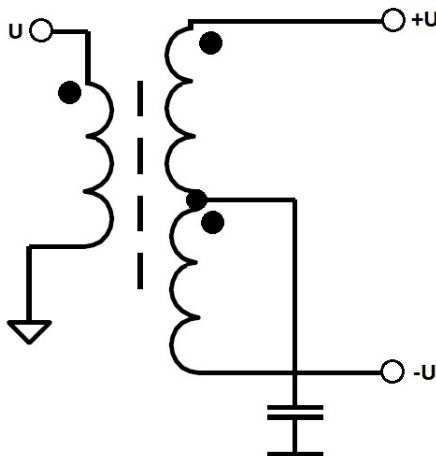
Pro dosažení větších proudů se vyrábějí optrony s dvěma tranzistory v Darlingtonově zapojení (obrázek 4.2), které dosahuje většího zesílení. Kolektorový proud může dosahovat až několik stovek miliampér, ale na úkor snížení přenosové rychlosti. V případě požadavku na lineární přenos ve větším rozsahu signálů využijeme optočlen s dvěma prvky na výstupní straně. Obvykle se jedná o dvě fotodiody. Jedna z nich slouží pro vlastní přenos signálu a druhá vytváří zpětnou vazbu, která kompenzuje nelinearitu a teplotní závislost LED diody [6].



Obr. 4.2: Schéma optronu s tranzistory v Darlingtonově zapojení. Převzato a upraveno dle [6].

4.3 Oddělovací transformátory

Dalším často aplikovaným způsobem je pomocí impulsních oddělovacích transformátorů. Zde se k oddělenému přenosu informace využívá vinutí na každé straně transformátoru, kde se uplatňuje elektromagnetická indukce. Oproti optické vazbě není tento typ galvanického oddělení limitován kmitočtem obvodu. Zjednodušený model ústrojí transformátoru pro odebrání kladných i záporných napětí na sekundární straně se nachází na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Oddělovací transformátor. Převzato a upraveno dle [8].

V případech, kdy požadujeme přenášet analogový signál se také ve velké míře využívá modulace. Modulace má především význam v zajištění neměnné amplitudy napětí na primární straně. Blokové schéma postupného zpracování signálu při využití modulace je na obrázku 4.4. Jak je při využívání modulačních technik obvyklé ke správnému fungování, tak i zde musí platit, že přenášený signál (modulovaný) má ideálně dvojnásobnou nebo vyšší frekvenci než signál, kterým modulujeme (modulační) [6].

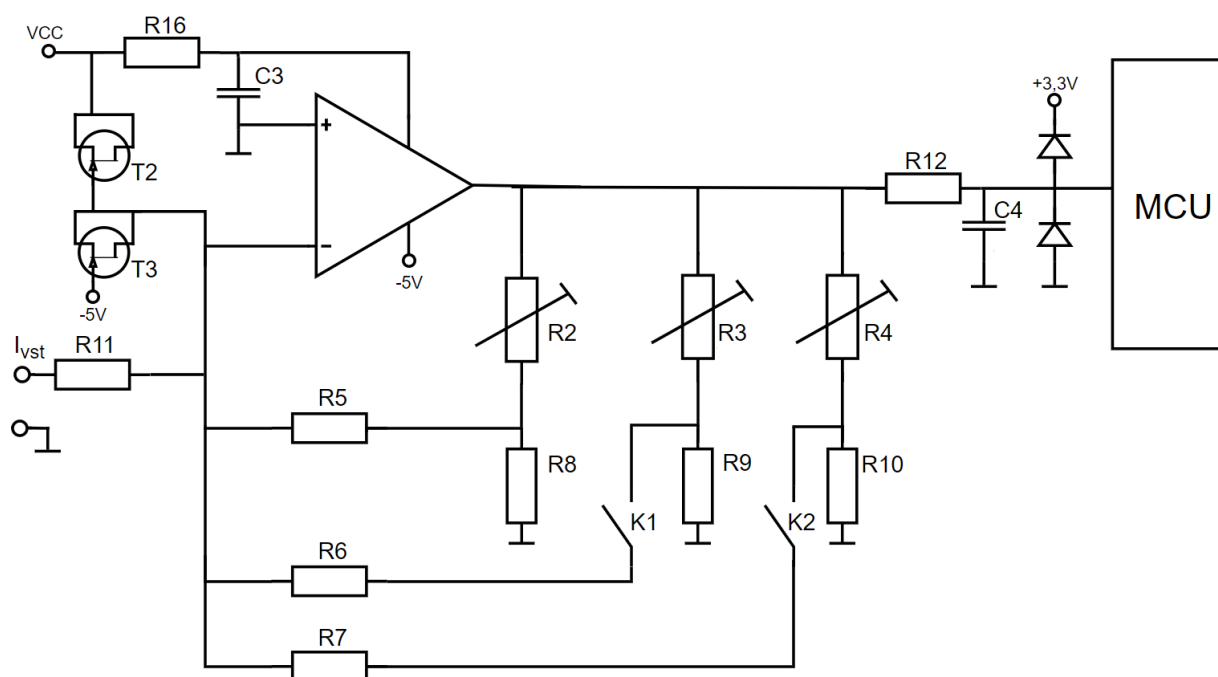


Obr. 4.4: Blokové schéma transformátoru s modulací. Převzato a upraveno dle [6].

5 Návrh schéma zapojení nanoampérmetru

Základ návrhu zařízení vychází z vybraného principu zapojení převodníku I/U se zpětnou vazbou, jenž byl už popsán v kapitole 1.2. Tento princip využívá operační zesilovač se zpětnovazebními rezistory. Jinými slovy se jedná o dělič napětí, který sníží napětovou hodnotu měřeného signálu. Takže můžeme zapojit kombinaci tří rezistorů o nižších hodnotách odporu, namísto jednoho rezistoru ve zpětné vazbě o velké jmenovité hodnotě. Zařízení je navrženo především pro měření množství elektronů, respektive proudu záporné polarity. Z toho důvodu je využit invertující vstup operačního zesilovače, který v aplikovaném zapojení obrací fázi o 180° , proto výstupní napětí převodníku I/U bude kladné hodnoty.

Celkové schéma zapojení bylo z důvodu samotné velikosti a přehlednosti rozděleno do tří částí - Vstupní díl, Napájecí obvody a Mikrokontrolér. Vstupní díl představuje analogovou část obvodu převodníku I/U, jehož zjednodušené zapojení ukazuje schéma 5.1.



Obr. 5.1: Zjednodušené zapojení Vstupního dílu.

5.1 Hlavní komponenty

Při návrhu bylo také dbáno na výběr hlavních součástek. Ze zapojení Vstupního dílu (5.1) se jedná o mikrokontrolér (MCU), operační zesilovač, ochranné JFET tranzistory (T2, T3) a dvojice relé pro přepínání měřících rozsahů, které jsou symbolicky znázorněny spínači (P1 a P2). Dále byly vybrány zdroje napájecích signálů, což jsou stabilizátory a měnič. V následujícím textu se nacházejí technické specifikace těchto součástek.

Operační zesilovač

Významná součástka celého analogového obvodu je operační zesilovač. Z nabídky společnosti Texas Instruments byl vybrán typ TLC271ACD. Jedná se o zesilovač s vysokou vstupní impedancí a s pomocnými vstupy pro korigování offsetu. Díky těmto vstupům je tedy možné nastavit a kompenzovat posun nulové úrovně (offset), která je ovlivňována například součástkami v obvodu nebo teplotními změnami. To jsou velmi výhodné vlastnosti pro přesnost měřícího zařízení. Další jeho podstatnou vlastností v případě naší aplikace je velmi nízký vstupní klidový proud, výrobce uvádí hodnotu 0,6pA.

Součástí obvodu zesilovače jsou také interní diody, jenž garantují ochranu vstupů proti nárůstu napětí. proudu do hodnoty 100mA. Operační zesilovač je schopný pracovat ve třech režimech, podle nichž se mění některé vlastnosti zesilovače viz tabulka 5.1. Volba režimu se provádí tím, že přivedeme na vstupní pin (8) zesilovače určitou hodnotu napětí. Pro režim Low je potřeba plné napájecí napětí VDD, pro zvolení režimu Medium je potřebné připojit pin přes rezistory 1MΩ mezi napětí VDD a GND. Třetí režim High je aktivní, pokud je vstup pinu připojen na GND. V případě aplikace v obvodu nanoampérmetru jsou napájecí signály VDD=5V a GND=-5V [12].

Tab. 5.1: Parametry operačního zesilovače TLC271ACD [12].

Parametr	High režim	Medium režim	Low režim
Klidový příkon [mW]	3,4	0,5	0,05
Rychlost přeběhu [V/us]	3,6	0,4	0,03
Fázová bezpečnost	46°	40°	34°
Jednotková šířka pásma [MHz]	1,7	0,5	0,09
Ekvivalentní vstupní šumové napětí na 1kHz [nV/ \sqrt{Hz}]	25	32	68

JFET

Jako vedlejší přepětová ochrana vstupu operačního zesilovače se v obvodu nacházejí dva tranzistory BF545C technologie JFET. Tento unipolární tranzistor je v pouzdru SOT23, takže se jedná o malou smd součástku. Pracuje se zápornými hodnotami napětí, jelikož je tvořen N-kanálem. Výrobce uvádí, že jeho výhodou je především nízká úroveň nežádoucího svodového proudu (typ. 0,5pA) a především z toho důvodu byl vybrán [10].

Pro získání jistoty, že bude skutečně splňovat podmínku minimálního zbytkového proudu, byla provedena praktická zkouška. Celý tranzistor i s kabelem měřicího přístroje byl během měření zastíněný. Následně bylo zjištěno, že hodnota zbytkového proudu se pohybuje pod hranicí 5pA a nepřekročí ji ani při úmyslném ohřátí okolí JFETU. Takovou velikost nežádoucího proudu lze vykompenzovat v rámci kalibrace nulové hodnoty nanoampérmetru. Naměřená hodnota byla vyšší, než očekávaná dle dokumentace. Musíme brát v potaz, že naměřenou hodnotu kromě samotného svodového proudu mohla také ovlivnit chyba zvolené měřicí metody.

Relé

Pro změnu měřících rozsahů, respektive pro připojení zpětnovazebních rezistorů jsou použity dva typy relé. Prvním použitým typem je elektromagnetické relé RELES1A 120 000. Jedná se o klasické jazýčkové relé od firmy COSMO. Jmenovitá hodnota spínacího napětí cívky je 12V a maximální možné napětí je 20V. Cívka relé má odpor 1000Ω, proto je spínací proud 12mA. I přes přítomnost cívky, která je vzhledem k rozměrům nepraktická, je celková velikost relé malá. Proto ho lze použít i na desku plošných spojů.

Druhé bylo vybráno polovodičové relé CPC1004N od výrobce IXYS. V obvodu slouží pro galvanické oddělení řídicí části tvořenou mikrokontrolérem a ovládané části, kde se nachází polovodičové relé pracující na jiném zemním potenciálu. Toto relé pracuje s optickou vazbou, která je tvořena fotodiodou a fototranzistorem. Díky využití fotodiody se hodnota spínacího proudu pohybuje pouze kolem 2mA. Ten lze v našem případě lehce dosáhnout napětovým signálem pouze 5V. Doba sepnutí je kratší v porovnání s elektromagnetickými relé a činí 3ms. Jelikož má jádro tvořené velmi malou fotodiodou a fototranzistorem, tak je celková velikost součástky srovnatelná s jinými SMD pouzdry a mnohokrát menší než výše popsané relé.

Mikrokontrolér

Mikrokontrolér (MCU) je další důležitá část zařízení, neboť zpracovává analogový signál ze vstupního obvodu a převádí ho na digitální. V případě nanoampérmetru je důležité zaměřit se na rozlišení A/D převodníku pro dosažení dostatečné přesnosti měřených hodnot.

Cílem je získat rozlišení měřícího zařízení v jednotkách pikoampér (10^{-12}A). Pro uvažovaný rozsah 2nA (10^{-9}) představující poměr 1:2000 je tedy teoreticky nutný 12-ti bitový převodník tzn. 4096 hodnot. Avšak skutečný rozsah hodnot převodníku je nižší, proto je k praktickému využití vhodnější aspoň 14 nebo 16bitový A/D převodník, zajišťující dostatečných rozsah hodnot s rezervou. Z dostupných variant od společnosti Silicon Labs byl vybrán podle převodníku mikrokontrolér C8051F352 s 16bitovým A/D převodníkem, který je z teoretického hlediska pro požadované rozlišení 1pA vyhovující.

Tab. 5.2: Technické parametry mikrokontroléru C8051F352 [11].

Napájecí napětí	2,7 až 3,6V
Rozlišení A/D převodníku	16 bitů
Flash paměť	8 kB
Počet vstupů a výstupů	17 I/O
Velikost datové sběrnice	8 bitů
Maximální hodinový signál	50 MHz
Typ a velikost pouzdra	LQFP-32 (7x7mm)

Měnič

Zařízení je napájeno stejnosměrným napětím 15V, které je dále přeměněno na požadované hodnoty napětí. Pro napájení součástek jako jsou komunikační optočleny, operační zesilovač nebo polovodičové relé slouží napěťový signál +5V (VCC) a -5V. Ten je získáván pomocí vybraného měniče. Konkrétně zvolený TEN3-1221 je izolovaný měnič z typové rodiny TEN3 od firmy TRACO, který ze stejnosměrného vstupního napětí v rozsahu 9 až 18V dosahuje na výstupu napětí hodnot kladných i záporných 5V. Podstatným parametrem je ten, že se jedná o měnič vytvářející galvanické oddělení. Izolační odpor je větší než $1\text{G}\Omega$ a izolační napětí je 1,5kV. Výhodou jsou také jeho malé rozměry, neboť je konstruován pro použití na desky plošných spojů. Dle údajů od výrobce by měl výkon měniče dosahovat hodnoty 3W [13].

Stabilizátory

Pro elektromagnetické relé je potřebný napájecí signál o hodnotě 12V, jenž je přiváděn ze stabilizátoru. Součástka 78L12 představuje obyčejný stabilizátor napětí sloužící v obvodu k získání výstupního napětí 12V z původních 15V přiváděných na vstup. Stabilizované výstupní napětí je využíváno v obvodu pouze k přepínání resp. vybuzení cívek jazýčkových relé, které svým sepnutím aktivují další měřicí rozsahy. Jelikož tedy není stabilizátor přímo součástí měřicího obvodu, tak jeho případné rušení nebude ovlivňovat přesnost zařízení.

V zařízení se nachází ještě druhý stabilizátor, který je pouze zdrojem napájecího napětí mikrokontroléru. Typově označený LT1086CT-3,3 dovoluje regulovat až z hodnoty 20V na kladné napětí 3,3V. Jedná se o součástku s třívývodovým pouzdrem s malým chladičem, který odvádí teplo a tím dokáže stabilizátor pracovat při provozní teplotě až 125°C [14].

5.2 Rozbor a popis schéma zapojení

Zde jsou blíže specifikované významy součástek, postupný popis a vysvětlení úseků schéma zapojení. Jelikož byl požadavek, aby zařízení mělo tři měřicí rozsahy, tak je pro každý rozsah jednotlivě navržena zvláštní zpětnovazební kombinace odporů. Odporový dělič je v případě navrženého nanoampérmetru realizován nejen pomocí rezistorů, ale také jedním trimrem sloužící pro dodatečnou změnu hodnoty celkového odporu zpětné vazby.

Ve všech částech obvodu se nacházejí keramické kondenzátory především u zdrojů napětí (např. měnič a stabilizátory) a citlivých integrovaných obvodů (např. operační zesilovač, mikrokontrolér, apod.). Ty jsou nazývány jako blokovací, neboť u napájecích pinů součástek vyhlazují napěťové špičky, na něž jsou integrované obvody citlivé. V převládající většině případů jsou použité v hodnotě 100nF, což je obvyklá hodnota pro blokovací kondenzátory.

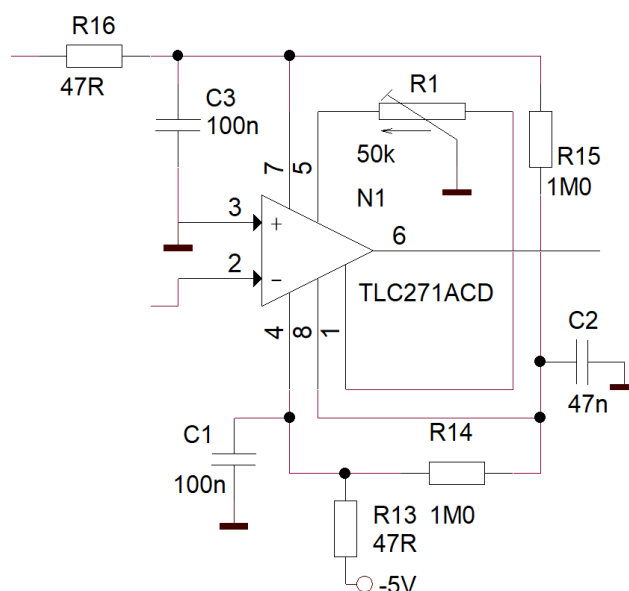
Vstupní díl

Tento úsek rozděleného schéma obsahuje analogovou část obvodu. Přímou vstupní svorkou nanoampérmetru se nachází rezistor $R11$, zde vytváří napěťový úbytek. Jeho hodnota byla navržena tak, aby při největší možné hodnotě proudu 200nA bylo na tomto rezistoru napětí několik jednotek mV. Konkrétně byla velikost rezistoru vypočtena pomocí ohmova zákona pro hodnotu 20mV (viz 5.1), proto byla navržena velikost rezistoru 100k Ω .

$$R_{11} = \frac{U_{x11}}{I_{x11}} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{200 \cdot 10^{-9}} = 100k\Omega \quad (5.1)$$

Vedle vstupních pinů pro připojení kabelu, přivádějícího měřený proud a zemní potenciál, je i ve schématu symbolicky znázorněn zemnicí otvor. Ten slouží pro uzemnění vnějšího krytu zařízení na společnou vnitřní zemi (GND). K němu je připojený keramický kondenzátor (*C8*) podobně jako ostatní aplikované blokové kondenzátory o jmenovité velikosti 100nF. Společně s drátovým rezistorem (*R19*) tvoří filtr proti nežádoucímu rušení, který nejvíce produkuje měnič napětí (*N2*).

Dále je důležitý operační zesilovač zapojený v invertujícím režimu. Citlivé přírůdky napájecích napětí jsou opatřeny blokovacími kondenzátory *C1* a *C3* o hodnotě 100nF. Vstupy pro nastavení offsetu jsou propojeny trimrem *R1*, pomocí něhož bude při kalibraci zařízení možné měnit hodnotu odporu a tím i hodnotu offsetu zesilovače. Offset představuje nějakou hodnotu napětí, která musí být mezi diferenčními vstupy operačního zesilovače, aby došlo k dosažení nulového napětí na výstupu. Poslední vstup zesilovače (8) je zapojený jak doporučuje výrobce. Proto je připojen přes rezistory *R14* a *R15* o velikosti 1MΩ mezi napájecí napětí *VCC* a -5V. Paralelně k pinu je ještě připojen kondenzátor *C2* (47nF) proti rušení. Tímto způsobem zapojení dojde k nastavení pracovního režimu zesilovače.



Obr. 5.2: Zapojení operačního zesilovače.

Výrobce uvádí, že operační zesilovač obsahuje ochranu vstupu i výstupu garantovanou do 100mA, která je realizována pomocí interních diod nacházející se v samot-

ném obvodu zesilovače. K této hlavní ochraně byla doplněna přídavná proti náhlému výskytu vysoké hodnoty napětí na invertujícím vstupu. Ta je zajištěna díky dvěma JFET tranzistory zapojených typově jako diody. Konkrétně první JFET ($T2$) je připojen ke kladnému napětí +5V právě přes společně spojené svorky Drain i Source. Dále je Gate připojen na invertující vstup zesilovače a zároveň na svorky dalšího JFETu. Druhý tranzistor ($T3$) má oproti předchozímu opačně připojené svorky a to tak, že společné svorky Drain a Source vedou ke vstupu zesilovače. Gate je připojen k zápornému napětí o hodnotě -5V, jelikož se jedná o tranzistor s kanálem typu N. Klíčovým parametrem je v tomto případě nízká hodnota zbytkového proudu tranzistoru. Pokud by totiž jeho velikost byla větší než pouze pár jednotek pA (10^{-12} A), tak by ovlivňovala měřený proud a tím pádem i přesnost měření. Avšak v tomto případě bude eliminován kalibrační nulové hodnoty zařízení, a proto ho můžeme zanedbat.

Celá část od vstupního rezistoru ($R11$), včetně obou JFET tranzistorů ($T1$, $T2$), invertujícího vstupu operačního zesilovače, až ke zpětnovazebním rezistorům je ve schématu ohraničena vodičem připojeným na vnitřní zemi. Nejedná se přímo o normální vodič, nýbrž o čáru znázorňující stínění, které napomáhá k eliminaci rušivých vlivů snižujících přesnost měření. Izolace stíněním byla potom prakticky provedena na desce plošných spojů.

V neposlední řadě jsou k operačnímu zesilovači připojené ve zpětné vazbě kombinace rezistorů. Nejmenší rozsah (2nA) je v obvodu zapojený jako výchozí a je tvořen rezistory $R5$, $R8$ a trimrem $R2$. Hodnoty byly zvoleny tak, aby splňovaly podmínky podle teoretického vzorce 5.2.

$$U_{V_{\text{yst}}} = I_{V_{\text{st}}} \cdot R_5 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_8} + \frac{R_2}{R_5}\right) \quad (5.2)$$

Rezistor $R5$ zvolíme při dodržení určitých podmínek, konkrétně tedy 1GΩ a 750kΩ. Zpětnovazební $R5$ je mnohokrát větší než ostatní rezistory, neboť jeho součinem s měřeným proudem ($I_{V_{\text{st}}}R_5$) dosáhneme hodnotu napětí 2V, což je většina hledané velikosti výstupního napětí. K němu je připojen odporový dělič z rezistoru $R8$ a trimru $R2$, který svým vnitřním odporem navýší celkový odpor, který má za následek změnu transimpedance převodníku I/U. Ta v případě tohoto převodníku udává poměr výstupního napětí ku vstupnímu proudu. Zpětnovazebními rezistory tedy dojde k dosažení takové transimpedance, aby výstupní napětí dosahovalo hledané hodnoty. Zároveň jsou rezistory zvoleny s ohledem na to, že maximální možná hodnota výstupního napětí je 2,4V, neboť překročení této hodnoty napětí by mohlo poškodit vstup analogově digitálního převodníku mikrokontroléru. Právě proto je

ve zpětné vazbě trimr, pomocí něhož bude korigována hodnota celkového odporu. Velikost rezistoru R_8 musí být větší než hodnota trimru R_2 . Díky tomu, že je úmyslně R_5 mnohonásobně větší než R_2 , má následně i podíl z teoretického vzorce $\frac{R_2}{R_5}$ výslednou hodnotu zanedbatelně nízkou. Když vyjádříme z původního vzorce (5.2) vztah pro určení velikosti R_2 , tak můžeme dopočítat, jak velkou hodnotu odporu bude třeba nastavit na trimru pro maximální rozsah 2nA viz výpočet 5.3.

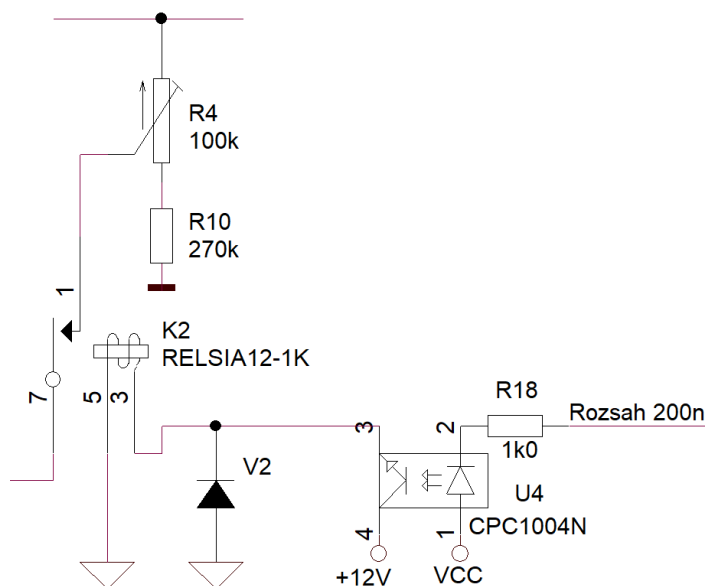
$$2,4 = (2 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^9) \cdot \left(1 + \frac{R_2}{750 \cdot 10^3} + \frac{R_2}{1 \cdot 10^9}\right) \Rightarrow R_2 = 148k\Omega \quad (5.3)$$

Ten ukazuje, že bude třeba trimrem nastavit odpor okolo hodnoty 148k Ω . To zároveň udává, o jaké hodnotě je potřeba vybrat trimr. Hodnota musí být samozřejmě nejbližší a zároveň vyšší. Dostupné trimry o nejbližších hodnotách jsou 100k a 200k Ω , proto byl vybrán trimr o velikosti 200k Ω . U proměnných rezistorů se může ještě více než u rezistorů pevných projevit určitý šum, především napěťový a teplotní. Je však lepší využít trimr, který slouží pro dodatečnou změnu hodnoty celkového odporu zpětné vazby a doladit měřicí rozsah i přesto, že může dojít k rušení. Namísto použití pevného rezistoru, u kterého by nepřesnost volby pevné hodnoty mohla ve výsledku způsobit větší chybu měření než šum, který lze eliminovat. Pevné rezistory mají také určitou toleranci hodnot, která se ve skutečnosti liší od jmenovitých hodnot. Především rezistory malých hodnot odporu jsou přesněji vyrobené, než velké. Takže se v praxi stává, že rezistor s uvedenou procentní tolerancí má po výrobě skutečnou toleranci jmenovité hodnoty o několik jednotek procent vyšší. V případě použití pevného rezistoru místo trimru by tedy došlo k odchylce, i kdyby byla hodnota rezistorů navržena teoreticky přesně. Při zvolení tohoto způsobu zapojení by bylo nutné dopočítávat odchylky mikrokontrolérem pro každý rozsah zvlášť, aby se vykompenzovala nepřesnost hodnoty celkového odporu zpětné vazby. Takový způsob by bylo možné aplikovat, avšak vypočtené odchylky jednotlivých rozsahů by se hodnotami velmi lišily, což je další faktor snižující přesnost měření. Trimrem bude možné při úvodní kalibraci zařízení korigovat hodnotu napětí na výstupu operačního zesilovače pro konkrétní měřicí rozsah, což je výhoda, která pomůže k lepšímu nastavení zařízení a zároveň ke snížení odchylky měření. Zde budou sice také vypočteny odchylky, avšak následně dopočítané koeficienty odchylek poslouží pro jemnou korekci a jejich hodnoty budou vzájemně podobné.

Další hodnoty rezistorů a trimrů pro ostatní měřicí rozsahy jsou navrženy tak, aby trojice rezistorů jednoho rozsahu paralelně v kombinaci s další trojicí vytvořila takovou velikost celkového odporu zpětné vazby, respektive hodnoty transimpedance, díky které bude činit hodnota výstupního napětí stále maximálně 2,4V. Pro rozsah s maximálním měřeným proudem 20nA je třeba dosáhnout celkového odporu

120M Ω . Tudíž pro 10krát větší rozsah 200nA je teoreticky nutná 10krát menší hodnota celkového odporu (12M Ω) oproti předchozímu rozsahu. Tyto vzájemné poměry mezi rozsahy se projeví na velikostech hlavních rezistorů, které tvoří hlavní část velikosti celkového odporu. Proto je pro rozsah 20nA hlavní rezistor $R6$ zvolen 100M Ω , což představuje desetinu hodnoty 1G Ω rezistoru $R5$. Pro největší rozsah 200nA je hlavní rezistor $R7$ zase 10krát menší, než hodnota rezistoru $R6$ z rozsahu 20nA.

Po základním rozsahu 2nA se další rozsahy aktivují nepřímo signálem z mikrokontroléru. Přepínání každého rozsahu je prováděno dvěma relé. Citlivé polovodičové relé je ovládáno pomocí napěťových signálů a svým spínáním uvádí do chodu jazýčkové relé, které spojuje kontakty mezi rezistory odporové sítě. Zapojení polovodičového relé je navrženo takovým způsobem, aby docházelo k jeho spínání na základě signálu o nízké úrovni. To lze vidět na obrázku 5.3, který ukazuje propojení dvojice relé mezi zpětnovazebními rezistory pro rozsah 200nA (u rozsahu 20nA je zapojení relé totožné). Například signál *Rozsah200n* změnou své napěťové úrovně způsobí, že relé U4 sepne na sekundární straně, čímž dojde k propojení kontaktu a napětí 12V je přivedeno na primární kontakt jazýčkového relé. Toto napětí následně nabudí cívku relé, které sepne kontakty a dojde k připojení nové kombinace rezistorů do obvodu. Rozsah se zvětší tímto paralelním připojením dalších rezistorů, čímž dojde ke snížení celkové hodnoty odporu ve zpětné vazbě.



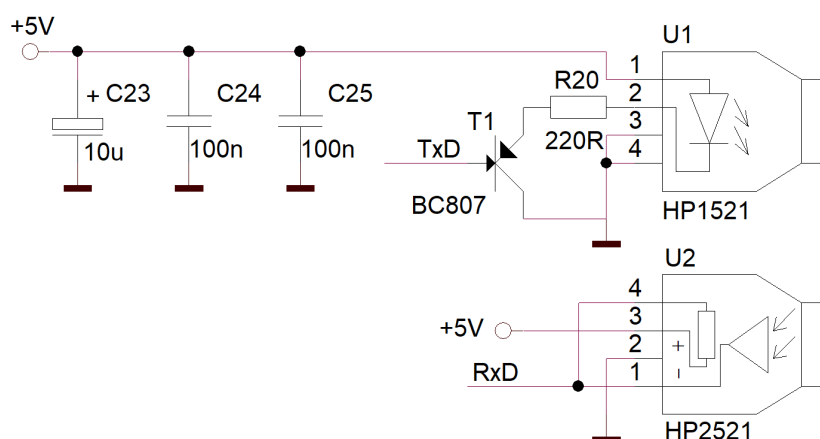
Obr. 5.3: Zapojení relé pro rozsah 200n.

Rezistor $R12$ společně s paralelně spojeným kondenzátorem $C4$ tvoří integrační článek (filtr dolní propusti) na výstupu analogové části zapojení, sloužící k eliminaci šumu a vyfiltrování rušení v měřeném signálu pro dosažení co největší přesnosti

měření. V obvodu jako přepěťová ochrana působí následné dvě rychlospínací diody (V_3 , V_4), jenž jsou připojeny mezi napájecí svorky (VCC a GND). Nachází se zde i hlavní konektor (X_4), pomocí něhož je připojen napájecí signál o velikosti napětí 15V.

Napájecí obvody

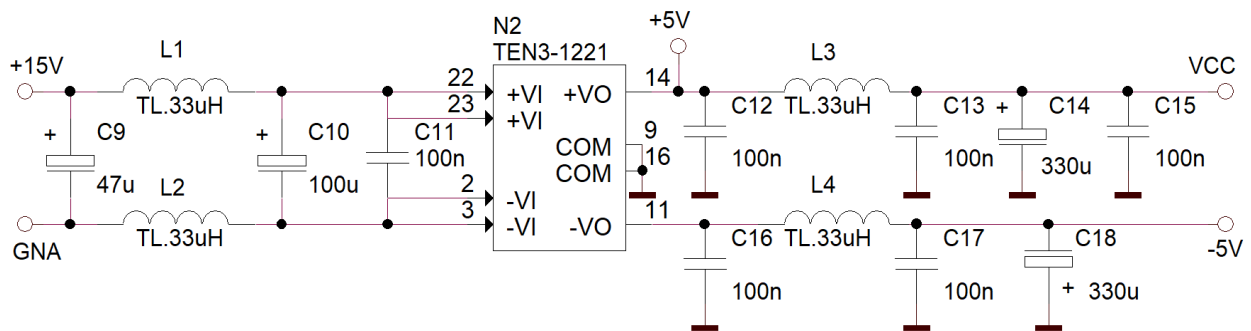
V této části schématu se nachází zapojení měniče, obou stabilizátorů a také optočlenů. Optočleny zajišťují komunikaci zařízení tzn., že přenáší veškeré signály mezi mikrokontrolérem a počítačem. $U1$ (HP2521) pracuje jako přijímač, kterým dochází k příjmu řídicí informace z počítače a ta je následně přímo přiváděna (signálem RxD) do mikrokontroléru. Opačnou cestu komunikace plní vysílač $U2$ (HP1521). Ten je připojen přes tranzistor ($T1$), do jehož báze je přiváděn signál k přenosu (Tx). Zde je napájecí signál navíc ošetřen proti rušení dvěma blokovacími kondenzátory ($C24$, $C25$) o velikosti 100nF. Dále pro filtraci rušení je doplněn kondenzátor 22μF ($C23$), aby mohl být optický signál korektně vyslán.



Obr. 5.4: Zapojení optočlenů.

Izolovaný měnič ($N2$) tvoří hlavní zdroj napětí kladných a záporných 5V. Na jeho vstup je přiváděno externí napětí 15V, které je ještě před vstupem ošetřeno kombinací elektrolytických kondenzátorů 100μF a 47μF ($C9$, $C10$), blokovacím kondenzátorem 100nF a tlumivkami ($L2$ a $L4$) o velikosti 33μH, které slouží jako filtrační prvek harmonických složek. I na výstupní straně měniče se nacházejí tlumivky $L1$ a $L3$. Protože jsou měniče, respektive spínané zdroje obecně častým zdrojem rušení, tak právě tyto tlumivky dohromady s keramickými blokovacími kondenzátory tvoří LC filtr zajišťující společně s ostatními kondenzátory ochranu proti elektromagnetickému rušení, napětovým špičkám a k filtraci harmonických složek. K tomuto filtru jsou přidány také elektrolyty $C14$ a $C18$, které v kombinaci s keramickými

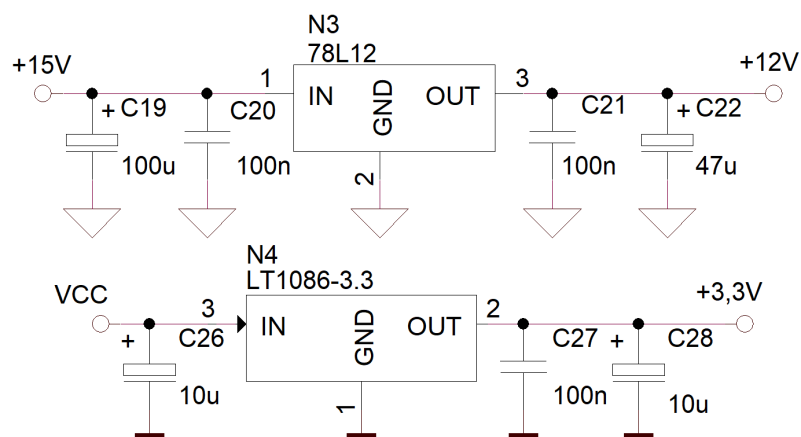
kondenzátory zlepšují odolnost vůči proudovým špičkám. Na konci kombinace všech kondenzátorů a LC filtru je odebrán napěťový signál $+5V$ (VCC) napájející relé s optickou vazbou a záporný signál $-5V$. Na výstupní straně už jsou všechny kondenzátory připojeny na zemní potenciál měřicího zařízení na rozdíl od vstupu, jenž je galvanicky oddělen. Při ožívování zařízení byla k výstupním svorkám připojena sonda osciloskopu. Orientačně byl pozorován signál z hlediska rušivého šumu. Avšak stanovit konkrétně velikost rušení, který vzniká v měniči, je obtížné. Tento šum je totiž zkreslen třeba i tím, že ze samotné sítě také proniká rušení přes stejnosměrný zdroj.



Obr. 5.5: Zapojení měniče.

Protože je v obvodu využíváno elektrodynamické relé spínající při napětí 12V, tak se zde nachází stabilizátor $N3$. Ten z původní hodnoty 15V stabilizuje napětí na 12V. Jelikož slouží pouze pro relé a ty jsou od obvodu galvanicky oddělené, tak můžeme nechat zapojení stabilizátoru s odrušovacími kondenzátory připojené k vnějšímu zemnímu potenciálu. K elektrolytickým kondenzátorům o hodnotách 100 μ F a 47 μ F filtrujícím stejnosměrnou složku ($C19$ a $C22$) jsou připojené paralelně blokové keramické ($C13$ a $C14$), které v paralelní kombinaci s elektrolytickými zlepšují filtrační vlastnosti. Tento stabilizátor je teplotně stabilní, takže při zvýšené teplotě není jeho výstupní napětí téměř ovlivněno.

Mikrokontrolér pracuje s napájecím napětím v rozsahu 2,7 až 3,6V, proto je v obvodu přidán stabilizátor $N4$. Na jeho vstup je přivedený napěťový signál VCC , takže se jedná o odrušený signál kladných 5V. Na výstupní svorce je stabilizované napětí 3,3V, které je následně připojeno k mikrokontroléru přes blokové kondenzátor ($C27$) o hodnotě 100nF. Na vstupu a výstupu se nacházejí i další dva kondenzátory ($C26$, $C28$). Jejich minimální velikost 22 μ F je doporučována v dokumentaci výrobcem.



Obr. 5.6: Zapojení stabilizátorů.

Mikrokontrolér

V této části schéma se nachází už samostatný mikrokontrolér. Napájecí piny jsou AV+ a VDD, které mají v těsné blízkosti dva blokovací kondenzátory (100nF) *C32* a *C33*. K nim je shodně přiváděno napětí ze stabilizátoru 3,3V. Dále se zde nachází dva piny pro komunikační signály. Signál *TxD* přenáší signál k vysílacímu optočlenu, konkrétně tedy přenese naměřenou hodnotu proudu vyhodnocenou mikrokontrolérem. Druhý *RxD* zase pracuje opačným směrem tj. přivádí řídicí příkaz z optočlenu. Tyto signály jsou připojeny k pinům P0.4 a P0.5, což doporučuje výrobce v technické dokumentaci.

Jediný analogový vstup využitý pro analogovo-digitální převodník je AIN0.2. Sem vede nejdůležitější signál s označením *AIN*. Jedná se totiž o změřený napěťový signál, jenž je poté převeden převodníkem na digitální hodnotu. Tu dále zpracuje programová paměť tak, že stanoví výslednou hodnotu měřeného proudu. Piny VREF+ a VREF- slouží pro výběr externí či vnitřní referenční napěťové úrovně. Na základě doporučení výrobce jsou proto v obvodu kondenzátory *C30*, *C31* o velikosti 4,7μF a 100n. Dohromady blokují nežádoucí signál, který by se mohl neočekávaně na pinech objevit a tím negativně ovlivnit chování celého mikrokontroléru. V tomto případě je zapojení realizováno pro nastavení vnitřní reference. Aby takové nastavení bylo zcela korektní, tak se musí VREF- připojit společně s pinem AGND (Analogová země) k vnějšímu zemnímu potenciálu. Pin DGND (digitální země) je na stejném zemním potenciálu a postačuje ho přivést k vnější zemi přímo. Hodnota vnitřní napěťové reference se může pohybovat od 2,35 až 2,50. Při pokojové teplotě 25°C je však typická hodnota 2,45V. Teplotní koeficient je 15 ppm/°C tzn. zvýšení o 0,0027V při ohřátí na 100°C, takže je reference dostatečně teplotně stabilní.



39

5.3 Možné chyby měření

Diody V3 a V4 zapojené jako ochrana by mohly vlastním svodovým proudem zanášet odchylku přímo do analogového vstupu mikrokontroléru. Nejhorší případ by nastal, pokud by tekla plná hodnota zbytkového proudu 25nA z diody V4 [15]. Uvažujeme, že rezistor R12 o velikosti 10kΩ vytvoří vlivem svodového proudu úbytek napětí 0,3mV (viz 5.5).

$$I_D \cdot R_{12} = U_D \quad (5.4)$$

$$25 \cdot 10^{-9} \cdot 10 \cdot 10^3 = 0,3mV \quad (5.5)$$

Pokud bychom měřili na nejcitlivějším rozsahu 2nA při maximálním napětí z operačního zesilovače 2,4V, tak bude chybový proud činit 0,25pA (5.7).

$$I_{2n} \cdot \frac{U_D}{U_{\max}} = I_{CH_D} \quad (5.6)$$

$$2 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{0,3^{-3}}{2,4} = 0,25pA \quad (5.7)$$

Zbytkový proud diody by tedy způsobil odchylku pouze 0,0125%. Proto jsou diody zapojeny tak, že je jedna zapojena mezi zemi a měřený signál a druhá k měřenému signálu proti napájecímu napětí +3,3V, čímž se teoreticky docílí nulového svodového proudu, neboť se svodové proudy diod navzájem odečtou. V praxi nedojde k absolutnímu odečtení těchto proudů, ale dosáhne se omezení chyby natolik, že nedojde k ovlivňování přesnosti měření.

Samotné piny mikrokontroléru vykazují také svodový proud. Jeho maximální velikost nabývá 1μA, což by způsobilo výraznou odchylku měření. Taková hodnota platí ale v krajním případě, kdy dochází k maximálnímu zahřátí (85°C) integrovaného obvodu. Konkrétní typickou hodnotu za normálních teplotních podmínek výrobce neuvádí, ale chyba nehrozí, protože je započtena v rámci softwarové kalibrace prováděnou pomocí vypočtených koeficientů mikrokontrolérem. Koeficienty jsou stanoveny pro každý rozsah, čímž se sníží vliv chyb na přesnost měření. Teplotní drift vstupního pinu činící 10nV/°C nepředstavuje žádný zdroj chyby i při uvažování maximálního zahřátí, protože by se napětí na vstupu změnilo o 60nV a to je zcela zanedbatelné (odchylka 0,000025%) oproti maximálnímu napětí 2,4V [11].

Změna hodnoty trimrů ve zpětné vazbě se přímo projevuje na přesnosti měření. Když nastavením dojde ke změně o 1% rozsahu, neboli o $2k\Omega$, tak se i hodnota výstupního napětí posune o 0,00533V (5.10) tzn. odchylku měření 0,222%.

$$(I_{Vst} \cdot R_5) \cdot \left(1 + \frac{R_{2X}}{R_8} + \frac{R_{2X}}{R_5}\right) = U_{VstX} \quad (5.8)$$

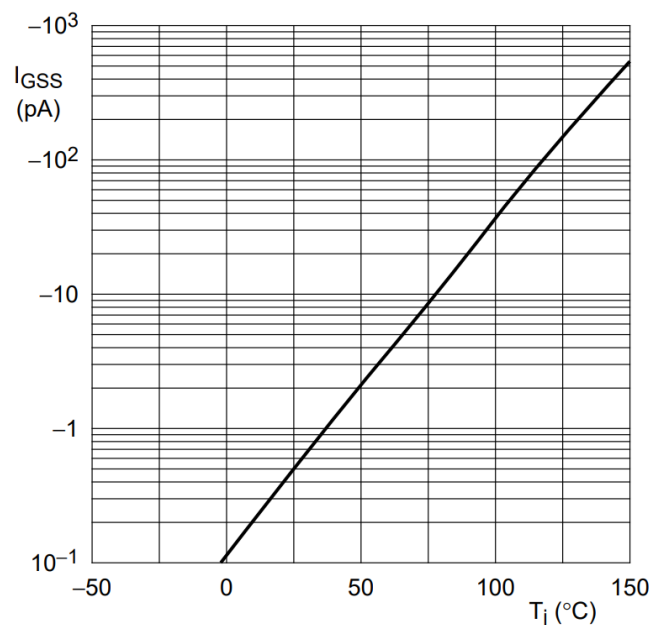
$$(2 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^9) \cdot \left(1 + \frac{148 \cdot 10^3}{750 \cdot 10^3} + \frac{148 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^9}\right) = 2,39496V \quad (5.9)$$

$$(2 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^9) \cdot \left(1 + \frac{146 \cdot 10^3}{750 \cdot 10^3} + \frac{146 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^9}\right) = 2,38963V \quad (5.10)$$

Pro měřený proud 2nA by taková změna velikosti trimru znamenala chybný nárůst o 4,45pA. Dále trimr podléhá i teplotní závislosti, která je 0,75% hodnoty odporu při ohřátí trimru na 100°C. Jedná se však o extrémní předpoklad, který neodpovídá vhodným měřicím podmínkám, protože kvůli zahřátí ostatních součástek a tím způsobených chyb by měření proudu bylo nepřesné. Podmínky vhodné pro měření představuje především ideální provozní teplota, která by se měla pohybovat kolem typické hodnoty 25°C.

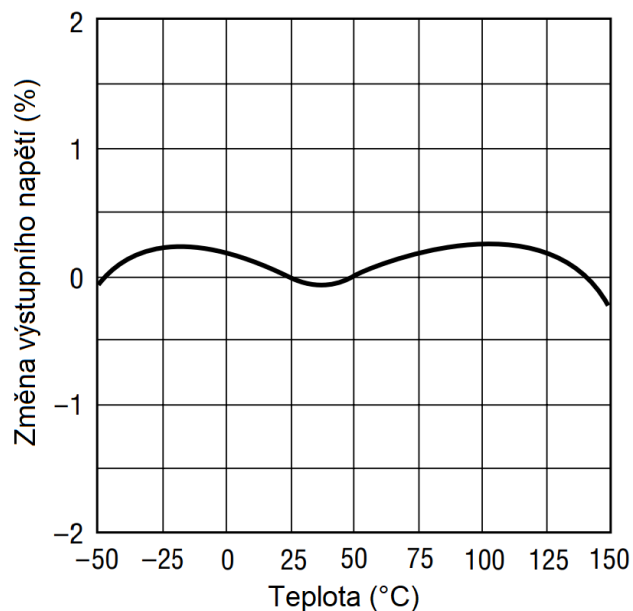
Citlivé elektronické součástky mění své parametry prudce s narůstající teplotou. To platí i v případě JFET tranzistorů připojených na vstup operačního zesilovače. Právě z důvodu přímého zapojení k větvi měřeného proudu by mohly chybně navýšovat hodnotu měřeného proudu. Podle charakteristiky (5.8) z dokumentace technických parametrů se při zahřátí tranzistoru na 75°C zvýší velikost svodového proudu k 10pA. Po přepočtu vzhledem k nejmenšímu rozsahu 2nA činí chyba vzniklá zahřátím 0,5%. V praxi se může závislost mírně lišit, ale stále se jedná o zanedbatelnou chybu.

U operačního zesilovače je třeba zohlednit vstupní klidový proud. Ten bude vykompenzován kalibrací nulové hodnoty zařízení, takže při normální teplotních podmínkách ho můžeme zanedbat. Pro zahřátí na teplotu 70°C je sice typická hodnota pouze 40pA, ale maximální činí 600pA. Při uvažování této extrémní situace by pro nejnižší rozsah 2nA dosahovala odchylka 30%. Ikdyž by typická hodnota proudu 40pA zahřátého zesilovače způsobila odchylku výrazně nižší (2%), tak je přesto důležité hlídat zahřívání součástky a tím se vyvarovat hrubé chybě měření proudu [12].



Obr. 5.8: Teplotní závislost svodového proudu (I_{GSS}) tranzistoru BF545 [10].

Stabilizátor (N_4) s výstupním napětím 3,3V je na rozdíl od druhého použitého stabilizátoru teplotně závislý, respektive hodnota výstupního napětí je závislá na teplotě součástky. Z charakteristiky 5.9 je zřejmé, že při zahřátí na 100°C dojde ke změně výstupního napětí o 0,25%, což znamená změnu o 0,00825V. Tudíž je zřejmé, že případná změna napětí důsledkem zahřátí neohrozí mikrokontrolér, neboť jeho maximální přípustná hodnota napájecího napětí je 3,6V.



Obr. 5.9: Změna výstupního napětí v závislosti na teplotě stabilizátoru LT1086CT [14].

Z tabulky 5.3 lze souhrnně vidět, jaké chyby měření mohou eventuálně nastat. Velké množství součástek vykazuje určitou teplotní závislost vzhledem ke svým parametrům. Ve většině případů, včetně těch zmíněných, se jedná o zanedbatelné chyby. Některá pravidla je přesto vhodné dodržovat. Ideální je provádět měření v prostředí o pokojové teplotě. Neprovádět časově náročná měření, čímž předejdeme nadměrnému zahřívání zařízení. Pro přesné měření je důležitá i pravidelná kalibrace před zahájením měření, protože například trimry stárnutím své struktury mohou změnit skutečnou hodnotu odporu pro nastavenou polohu jezdce.

Tab. 5.3: Srovnání možných chyb a jejich odchylek měření vzhledem k rozsahu 2nA.

Zdroj chyby	Odchylka měření (T=25°C)	Odchylka měření	T(°C)
Operační zesilovač	(max.) 60pA => 3% (typ.) 0,6pA => 0.03%	(max.) 600pA => 30% (typ.) 40pA => 2%	70
JFET tranzistor	0.5pA => 0,025%	10pA => 0,5%	75
Změna trimru o 1%	4,44pA => 0,222%	0,1665%	100
Dioda	0,25pA => 0,0125%	8,5pA => 0,425%	80
Piny mikrokontroléru		0,000025%	85

6 Deska plošných spojů

Návrh desky plošných spojů byl proveden v programu EAGLE od společnosti Autodesk, který v plné verzi (EAGLE Premium) umožňuje navrhnout desku až o 16 signálových vrstvách, neomezenou velikost DPS a tvorbu vlastní knihovny konkrétní součástky tzn. její schématickou značku, pouzdro a footprint, respektive stopu na DPS. Konkrétně byl návrh proveden v tu dobu nejnovější vývojové verzi EAGLE 9.3.2. Výsledný návrh desky plošných spojů, v podobě jednotlivých vrstev, je obsažen v příloze A.2.

Nejprve bylo kompletní schéma překresleno, neboť samotné schéma zapojení bylo navrhováno v jiném programu OrCAD Capture. Jelikož program obsahuje pouze základní knihovny nejpoužívanějších součástek, tak bylo zapotřebí některé knihovny vytvořit přímo v aplikaci pro vlastní použití. Jednalo se kupříkladu o rezistory *R5* a *R6* s výrobním označením 3WK68006B, které vyrábí firma TESLA BLATNÁ. Tyto vrstvé rezistory jsou totiž vyráběny v tvarově specifickém pouzdře, které je tenké.

Vlastní DPS je navržena na čtyřech vrstvách pro dosažení malých rozměrů výsledné desky. Základní parametry výsledné desky plošných spojů se nachází v tabulce 6.1. Dalším důvodem proč byla zvolena vícevrstvá DPS je ten, aby mohly být zemnící a napájecí signály na samostatných vrstvách zvlášť od ostatních analogových a řídicích signálů. Takové rozdělení na vrstvy nám zvyšuje pravděpodobnost, že nebude docházet k rušení citlivých částí zařízení. Obecně je při návrhu čtyřvrstvé desky zvykem, že jsou signálové vrstvy obsazeny na vnějších stranách a napájecí vrstvy na vnitřních. Obě vnitřní vrstvy odděluje ve středu desky základní dielektrický materiál. Dvojice vnější a vnitřní vrstvy je na obou stranách desky oddělena prepregem, což je tenká impregnovaná vrstva sklolaminátu. Také důležitým pravidlem je dbát při využití integrovaných obvodů na to, aby u jejich napájecích vstupů byly blokové kondenzátory co nejblíže.

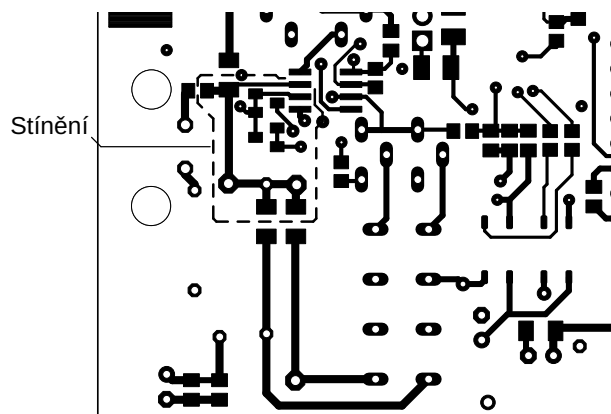
Tab. 6.1: Parametry desky plošných spojů.

Počet vrstev	4
Rozměry [mm]	65 x 70
Tloušťka [mm]	1,6
Síla mědi [μm]	35
Povrchová úprava	HAL Lead free

Na vrchní straně desky s první vrstvou (Top) jsou hustě rozmístěny téměř všechny

součástky. Na kraji vedle sebe se nachází napájecí konektor a optočleny pro komunikaci. U optočlenů je mikrokontrolér obklopený v těsné blízkosti příslušnými rezistory, kondenzátory a programovacím konektorem, aby byly cesty co nejkratší a tím nedocházelo k nežádoucímu rušení. Druhá vrstva je vnitřní a slouží pouze pro rozvedení napájení, aby nemohlo docházet k vzájemnému ovlivnění s jinými signály. Vede zde tedy napájecí signál k optočlenům z výstupu měniče a především odrušené napěťové signály VCC a $-5V$ potřebné pro napájení relé, operačního zesilovače, ochranných tranzistorů. VCC je v této vrstvě připojen i na vstup stabilizátoru, který stabilizovaným napětím 3,3V napájí mikrokontrolér. Třetí vrstva rozdělena na dvě samostatné části, které jsou zalaty mědí, představuje vrstvu zemnicí. Jedná se o kompletně vyplněné plochy galvanicky oddělených zemí, kde jedna náleží vnitřnímu zemnímu potenciálu zařízení (GND) a druhá vnějšímu ($AGND$). Všechny komponenty připojené na $AGND$ jsou situovány do jednoho společného rohu DPS, aby se zjednodušilo oddělení izolovanou plochou jedné zemnicí plochy od druhé. Na všech čtyřech vrstvách se také nachází na okraji desky malé plošky čtvercového tvaru, které propojuje prokovená díra (dále pouze prokov). Tato ploška dohromady s prokovem tvoří zemnicí otvor zařízení.

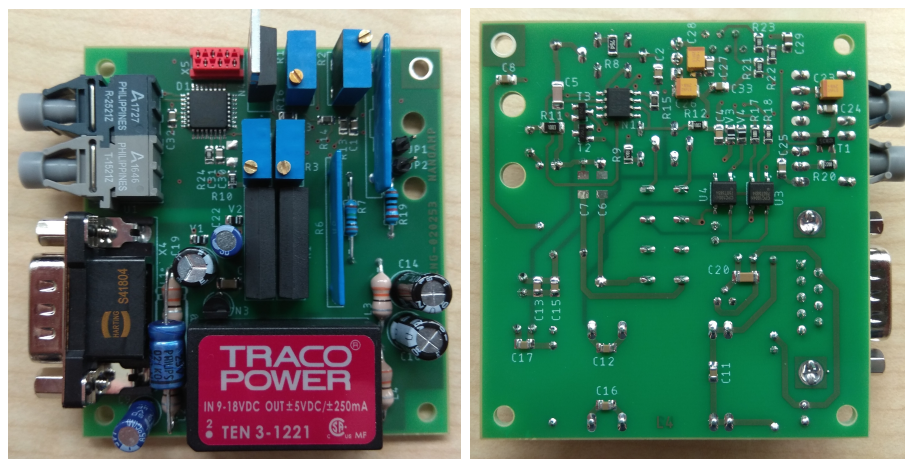
Nejvíce signálů obsahuje poslední čtvrtá vrstva (Bottom), protože jsou zde jenom malé pasivní smd součástky a tím zbývá více místa pro vedení cest. Nejvýznamnější signál v této části je cesta měřeného proudu vedoucího postupně od vstupního pinu k operačnímu zesilovači a z něj co nejkratší cestou do mikrokontroléru. V předchozí kapitole bylo už zmíněno, že se v obvodu nachází stínění. To je v návrhu DPS realizováno tenkou vodivou cestou, která obklopuje dva tranzistory JFET, konce vývodů zpětnovazebních rezistorů a některé piny operačního zesilovače. SMD rezistory, přes které vstupují signály do této části obvodu, jsou situovány tak, že stínění prochází mezi jejich kontakty. Každý konec stínění je přes prokov připojen k zemi (GND). Ilustrační obrázek 6.1 ukazuje obvod stínění, který znázorňuje čárkovaná čára.



Obr. 6.1: Detail stínění na DPS.

7 Oživení zařízení

Vyrobená DPS byla nejprve osazena a zapájena postupně všemi součástkami. Výslednou desku ukazuje obrázek 7.1



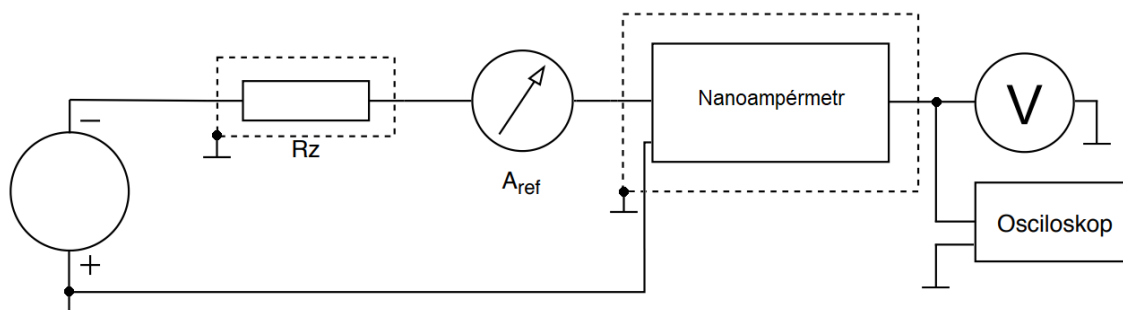
Obr. 7.1: Osazená DPS.

V prvním kroku oživení byl připojen hlavní napájecí konektor k zařízení. Tím bylo přivedeno stejnosměrné napětí 15V z externího zdroje. Následně proběhlo sondou osciloskopu ověření hodnot napěťových signálů na výstupu měniče. Dalším ověřovaným bodem byl výstup operačního zesilovače. Teoreticky by zde měl být nulový napěťový signál, avšak osciloskop ukazoval zvýšenou hodnotu napětí. To bylo ovšem v pořádku, protože se jednalo o offset operačního zesilovače. Proto je v obvodu trimr R1, kterým při dostatečné změně polohy jezdce dojde k vykompenzování offsetu, respektive k nastavení nulové hodnoty napětí na výstupu operačního zesilovače.

7.1 Ověření dosažených parametrů

Kontrolní měření bylo provedeno pro zjištění skutečných parametrů výsledného zařízení. Měřeným parametrem bylo především výstupní napětí operačního zesilovače, neboť je přímo závislé na velikosti měřeného proudu. Ověření parametrů proběhlo na pracovišti zapojeném principiálně stejně jako ukazuje obr 7.2. Zdroj měřeného proudu byl vytvořen pomocí napěťového zdroje a velké odporové zátěže R_z . Ještě před vstupem nanoampérmetru se nacházel referenční ampérmetr, aby bylo možné porovnávat parametry zařízení s přesně stanovenou hodnotou proudu. Jednalo se o ručkový multimetr s nejnižšími měřicími rozsahy pro měření proudu 3, 30, 100 a 300nA. S přesným rozlišením 0,2nA. Osciloskop sloužil pro orientační kontrolu průběhu signálu. Hodnota napěťového signálu byla měřena přesným multimetrem

Keysight U1401B. Rezistory tvořící odporovou zátěž R_z a stejně tak i nanoampérmetr byly obaleny stíněním, čímž se snížil vliv nežádoucího rušení z okolí. Stínění se skládalo z izolační nevodivé a hliníkové fólie odstíňující rušení. Ta byla připojena k zemnímu potenciálu zařízení.



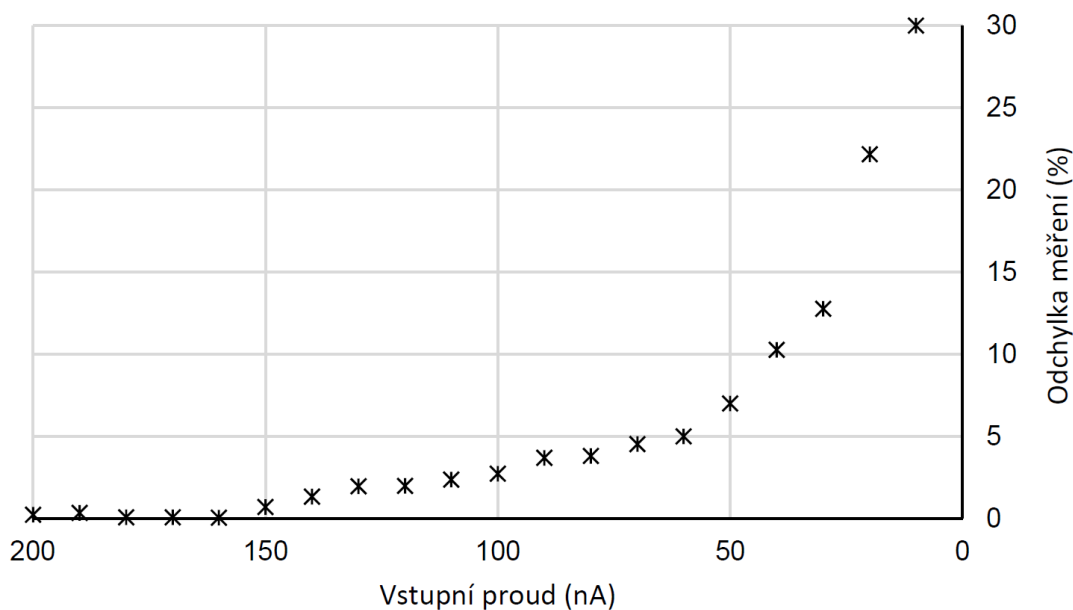
Obr. 7.2: Zapojení pracoviště pro měření parametrů.

Nejprve bylo proměřeno výstupní napětí pro rozsah 200nA. Zařízení bylo nastaveno, aby maximálnímu proudu 200nA odpovídal výstupní signál 2V, což dokazuje správnost návrhu, neboť pro takové nastavení byl obvod navrhován. Výpočtem podle vzorce 7.1 byly z naměřeného napětí stanovené odpovídající proudy. Hodnoty U_X a I_X představují aritmetické průměry pro 6 nejvyšších hodnot napětí a proudů, protože v nejvyšší části rozsahu je chyba měření nejmenší. Výpočet 7.2 ukazuje třeba stanovení proudu z napětí 1,531V, když přesná hodnota proudu měla být 150nA.

$$\left(\frac{U_X}{U_M}\right) \cdot I_X = I_M \quad (7.1)$$

$$\left(\frac{1,799}{1,531}\right) \cdot (175 \cdot 10^{-9}) = 149nA \quad (7.2)$$

Z hodnot nepřímo měřených proudů byly stanoveny odchylky vůči přesným hodnotám. Graf 7.3 ukazuje, že při měření nízkých hodnot proudů při měřicím rozsahu 200nA představuje výraznou odchylku, což je nevýhoda velkého rozpětí měřicího rozsahu. Odchylky při nízkých proudech se zvyšují také vlivem offsetu zařízení, který v této měřicí metodě lze snížit pouze v rámci nastavení operačního zesilovače, což není zcela dostatečné. Tato závislost jinak slouží především pro ověření, zda byl obvod správně navržen pro požadovaný rozsah. Odchylky měření nelze považovat za vlastní chybu nanoampérmetru, neboť jsou zkresleny chybou měřicí metody, chybou odečtem měřených hodnot a chybou výpočtu proudů.



Obr. 7.3: Závislost odchylky měření na vstupním proudu pro rozsah 200nA.

Dále bylo provedeno měření při zvýšených teplotních podmínkách. Prostředí kolem zařízení a součástky byly úmyslně zahřívány, avšak kontrolovaně se toto podařilo pouze do 50°C. Pro ideální zjištění teplotní závislosti zařízení, by bylo zapotřebí měnit teplotu celého měřicího prostředí a případně snímat teplotu součástek. Přesto lze z tabulky 7.1 vidět, že je zařízení schopné měřit bez výrazné chyby i při zvýšené teplotě (do 50°C) prostředí v blízkosti zařízení.

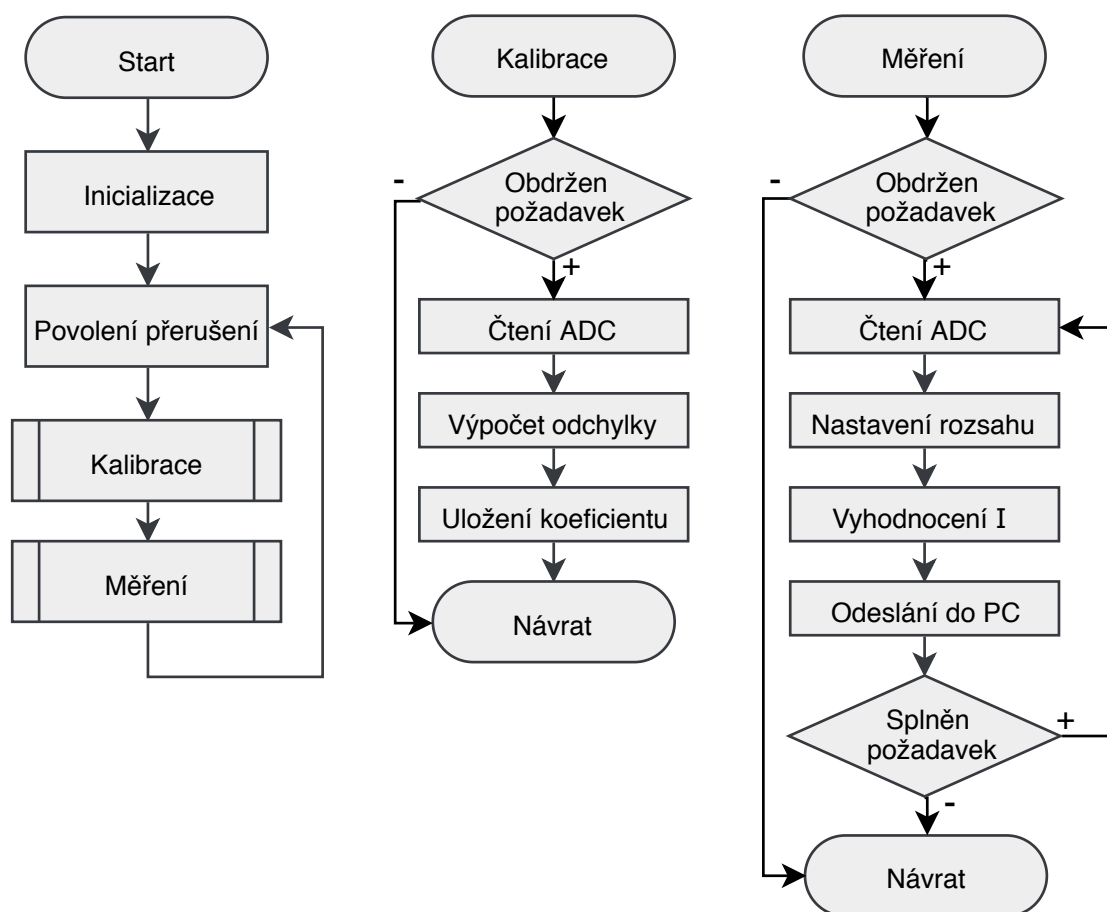
Tab. 7.1: Výstupní napětí při zvýšené teplotě prostředí (rozsah 200nA).

Teplota prostředí (°C)	Výstupní napětí (V)	Odchylka (%)
25	1,531	0
35	1.533	0,13
45	1,537	0,39
50	1,542	0,71

Stejným způsobem jako pro měřicí rozsah 200nA bylo měřeno i pro rozsah 2nA. V tomto případě se projeví nežádoucí vlivy způsobené nedokonalým zdrojem proudu a také nepřesností měřicí metody. Bylo tím aspoň zjištěno zda zařízení pracuje správně i pro tento rozsah. Výstupní napětí bylo nižší, než bylo mělo teoreticky dle návrhu být, avšak to může být dáno tolerancí velké hodnoty (1G) rezistoru (R5) ve zpětné vazbě.

7.2 Programové vybavení

Mikrokontrolér vyžaduje program pro jeho řízení. Jeho průběh představuje vývojový diagram na obrázku 7.4.



Obr. 7.4: Vývojový diagram programu.

Po uvedení do provozu, tzn. připojení napájecího napětí se nejprve vykoná inicializace všech pinů. V tomto úkonu dojde k přiřazení proměnných a nastavení využitých pinů, aby mohl mikrokontrolér vykonávat korektně hlavní program. Po povolení přerušení se začne program dotazovat v nekonečné smyčce, zda došlo k požadavku na kalibraci, měření proudu nebo zastavení měření. Podprogram pro zastavení není z důvodu jednoduchosti v diagramu uveden, neboť se jedná pouze o přerušení čtení AD převodníku. Jestliže bude přijat některý z požadavků, tak se vykoná příslušný podprogram.

8 Závěr

Bakalářská práce nejprve pojednává nad teoretickou částí, jenž byla rozdělena do čtyř úvodních kapitol popisujících všechny parametry a vlastnosti, na které by měl být brán zřetel při realizaci celého zařízení a následném využívání.

V rámci práce se podařilo navrhnout schéma zapojení podle zadaných vlastností. Zařízení pro měření proudu bylo navrženo pro měření proudů záporné polaroty a bylo založeno na principu převodníku proud \rightarrow napětí s využitím zpětnovazební sítě. Při návrhu byly dodrženy požadavky na tři měřicí rozsahy 2, 20 a 200nA, jejichž přepínání bylo koncipováno pomocí relé. Dalším splněným požadavkem byla komunikace pomocí světlovodů. Práce obsahuje i část věnovanou rozboru možných chyb měření.

Na základě schéma zapojení byla navržena deska plošných spojů malých rozměrů, což bylo dalším hlavním cílem. Návrh byl proveden v programu EAGLE. Výsledkem práce je tedy čtyřvrstvá deska plošných spojů o celkových rozměrech 65 x 70mm.

Práce také obsahuje vývojový diagram nastiňující, jak by bylo možné programové vybavení pro zařízení provést. Navržené zařízení bylo koncipováno pro případný software, pomocí něhož by docházelo ke čtení měřeného proudu v digitální hodnotě. Osazená deska plošných spojů byla úspěšně oživena a následně došlo kontrolním měřím k ověření parametrů. Nepodařilo se však stanovit, jakého rozlišení skutečně zařízení dosahuje. Pro toto ověření by bylo nutné měřit digitální hodnotu proudu, jelikož v tomto případě by se eliminovala chyba přesnosti odečtu hodnot, měřící metody a především vlivu offsetu zařízení. Bylo zjištěno, že zařízení s jednotlivými rozsahy odpovídá navrženým parametrům obvodu, neboť výstupní napětí operačního zesilovače dosahovalo s měnícím se vstupním proudem očekávaných hodnot.

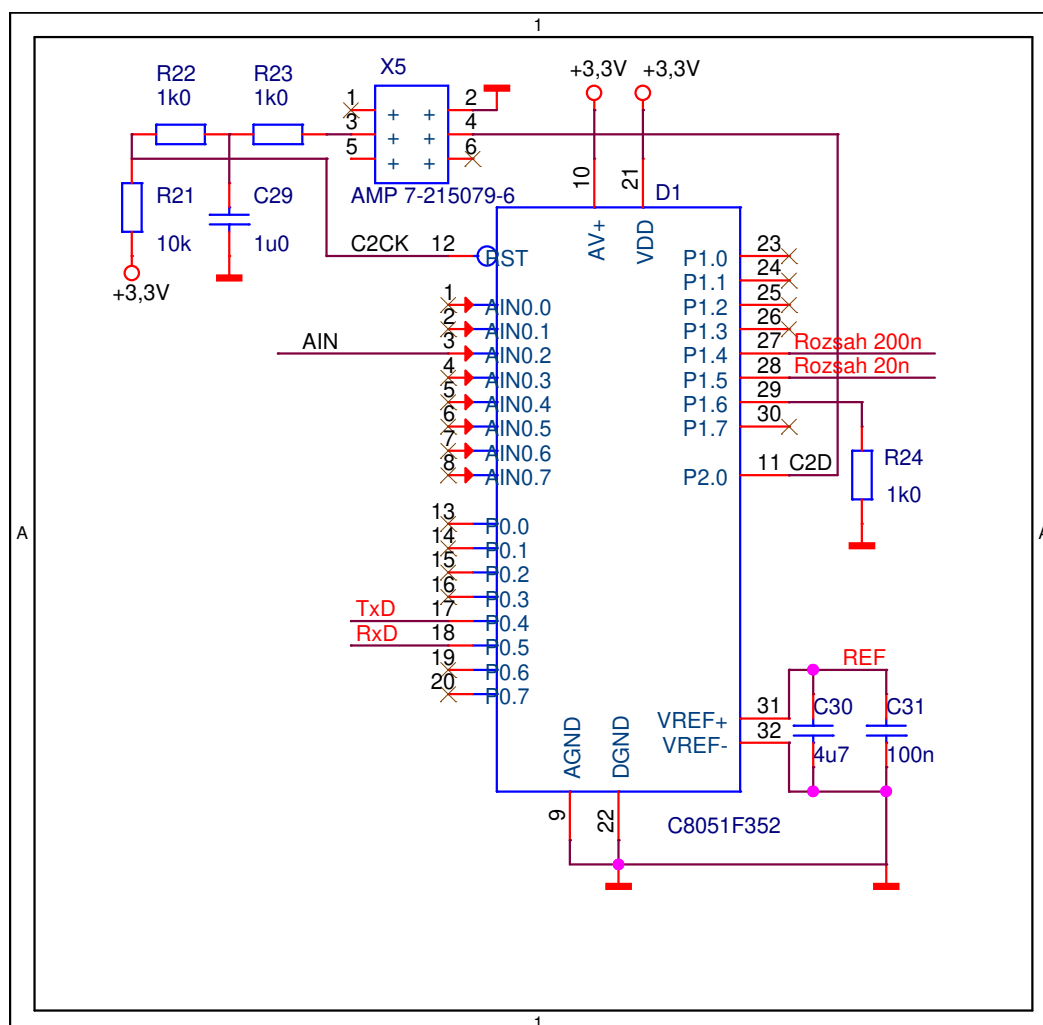
Literatura

- [1] *Měření v elektrotechnice*. Zpracoval kolektiv autorů. Brno: UTEE, FEKT VUT, 2010. 210 s.
- [2] *Měření v elektrotechnice*. Zpracoval kolektiv autorů. Brno: AMT a UTEE, FEKT VUT, 241 s.
- [3] TEKTRONIX. *Low Level Measurements Handbook* [online]. 7th Edition. United States: 2016. [citováno 2018-10-15]. Dostupné z URL:
<http://download.tek.com/document/LowLevelHandbook_7Ed.pdf>.
- [4] ARNAU, A., *Piezoelectric Transducers and Applications*, Second edition, Springer - Verlag, Germany, 2008, 481 s., ISBN 978-3-540-77507-2, DOI: 10.1007/978-3-540-77508-9.
- [5] JIN, Y.; SARKER, S.; LEE, K.; SEO, H. W.; KIM, D. M. Piezoelectric materials for high performance energy harvesting devices. *IEEE Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific)*, 2016, s. 1-4., Electronic ISBN 978-0-9888-8739-8.
- [6] VRBA, K. *Konstrukce elektronických zařízení*. 1.vydání, 1.část. Brno: UTKO, FEKT VUT, 2013. 249 s. ISBN 978-80-214-4719-6.
- [7] TOSHIBA: Datasheet TLP721 [online]. 2001-06-01. [citováno 2018-11-2]. Dostupné z URL:
<<https://wakamatsu.co.jp/waka/optron--tlp721-0.pdf>>.
- [8] KÖHLER, T. *Impulsní napájecí zdroj 100W*. [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2018-11-02]. Dostupné z URL:
<https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/10070/1/DP_prace_Kohler_E11N0020K.pdf>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [9] Polovodičové a elektromechanické relé pro každou aplikaci. *DPS Elektronika od A do Z*. [online]. CADware, 2016, (5) [cit. 2018-10-20]. Dostupné z URL:
<<https://www.dps-az.cz/soucastky/id:49779/polovodicove-a-elektromechanicke-rele-pro-kazdou-aplikaci>>.
- [10] NXP Semiconductors: Product data sheet BF545A; BF545B; BF545C [online]. 20011. [citováno 2019-2-28]. Dostupné z URL:
<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BF545A_BF545B_BF545C.pdf?>.

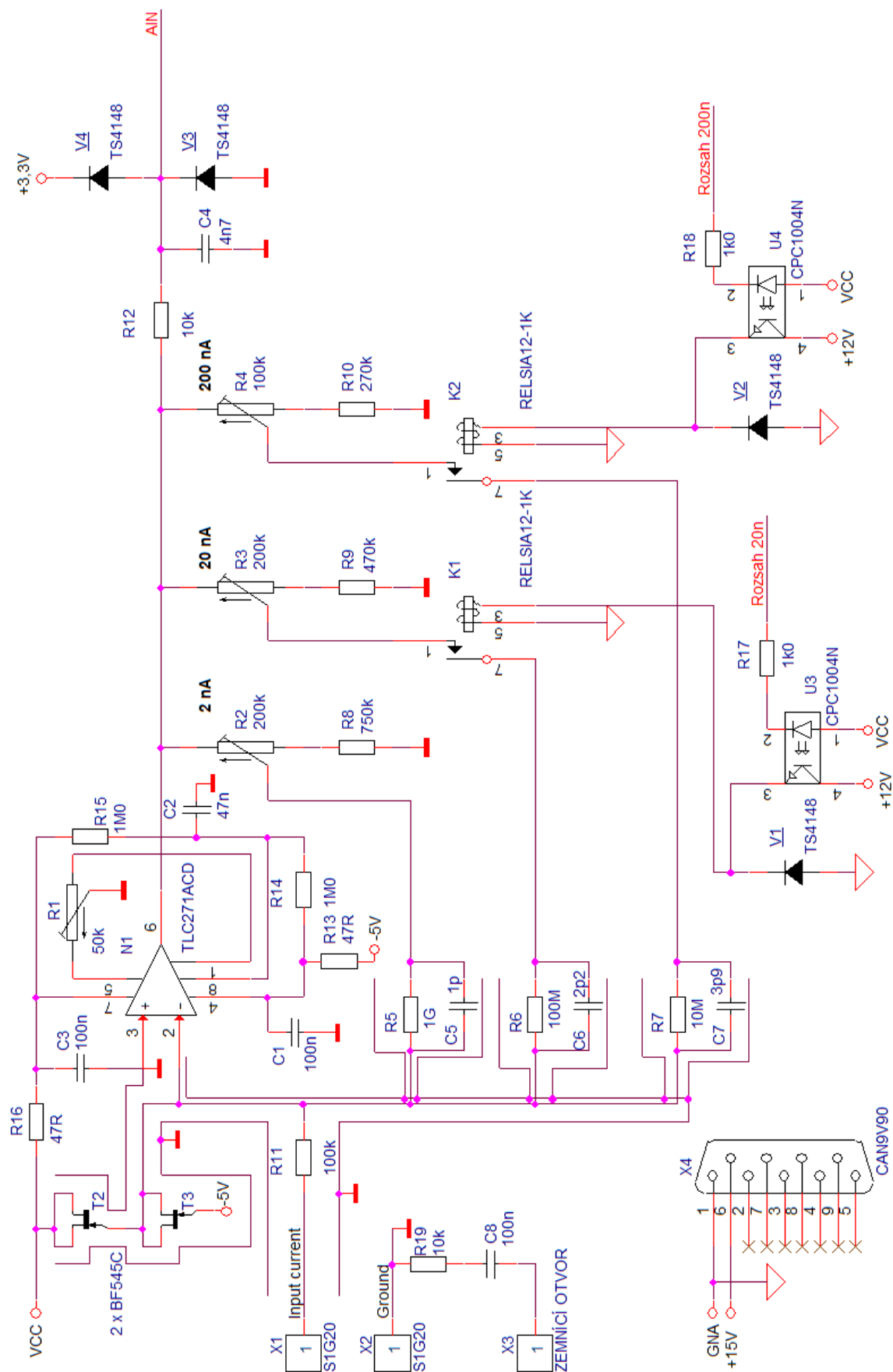
- [11] Silicon laboratories: Datasheet C8051F35x [online]. 2007. [citováno 2019-2-11]. Dostupné z URL:
<<https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/C8051F35x.pdf>>.
- [12] Texas Instrument: Datasheet TLC271ACD [online]. 2001. [citováno 2018-12-10]. Dostupné z URL:
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc271.pdf>>.
- [13] Traco Power: Datasheet TEN-1221 [online]. 2018. [citováno 2018-12-10]. Dostupné z URL:
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc271.pdf>>.
- [14] Linear Technology Corporation: Datasheet LT1086 [online]. [citováno 2019-2-11]. Dostupné z URL:
<<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1086ffs.pdf>>.
- [15] DC COMPONENTS: Datasheet CD4148W/WS/WT [online]. 2017. [citováno 2019-5-15]. Dostupné z URL:
<<https://www.dccomponents.com/upload/product/original/806236332588.pdf>>.

A Přílohy

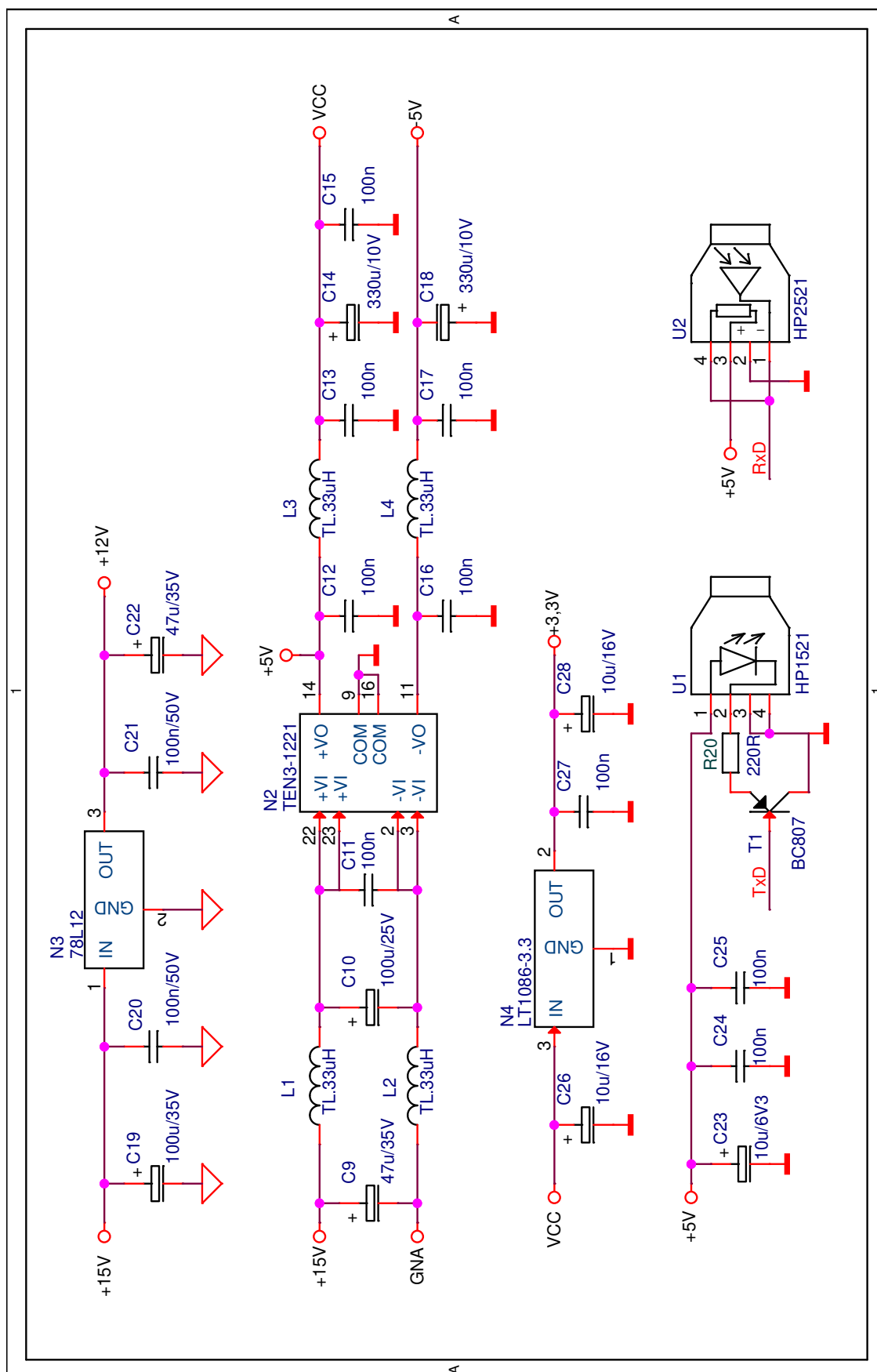
A.1 Schéma zapojení



Obr. A.1: Schéma zapojení - Mikrokontrolér.

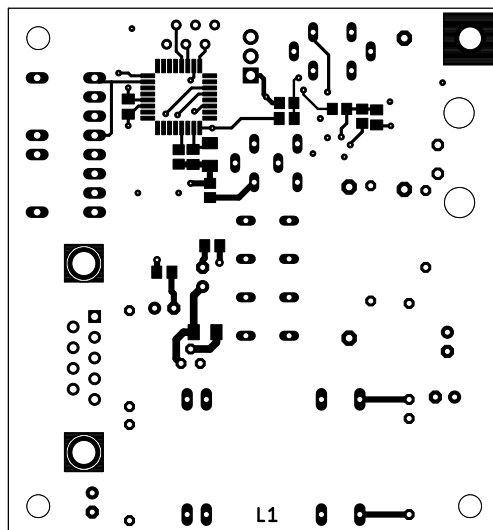


Obr. A.2: Schéma zapojení - Vstupní díl.

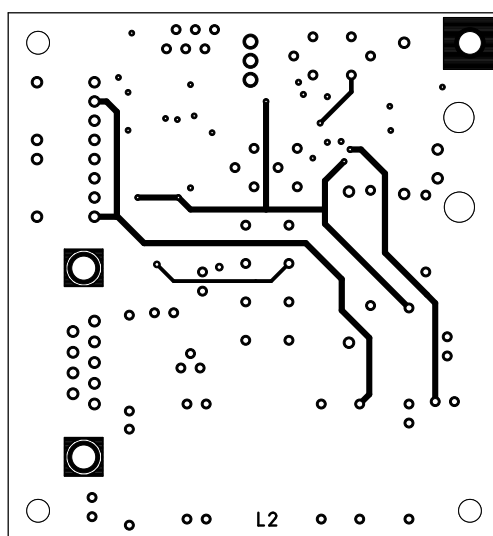


Obr. A.3: Schéma zapojení - Napájecí obvody.

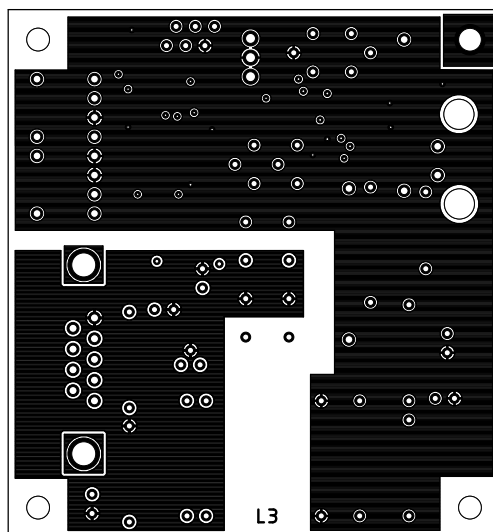
A.2 Deska plošných spojů



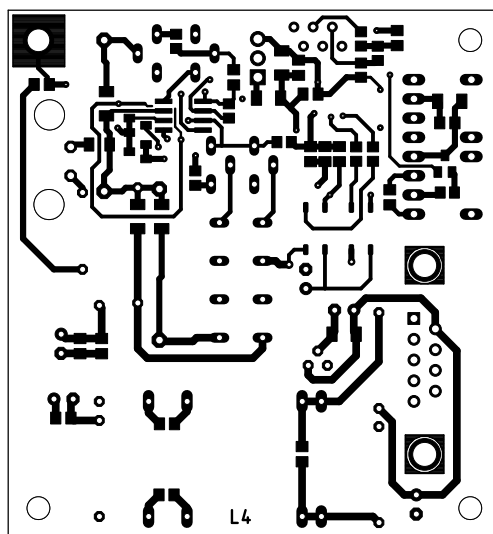
Obr. A.4: První vrstva (Top) DPS.



Obr. A.5: Druhá vrstva DPS.



Obr. A.6: Třetí vrstva DPS.



Obr. A.7: Čtvrtá vrstva (Bottom) DPS.

A.3 Seznam použitých součástek

Typ součástky	Označení	Hodnota	Množství	Specifikace
Kondenzátor	C1 C3 C8 C11 C12 C13 C15 C16 C17 C24 C25 C27 C31 C32 C33	100nF	15	Kondenzátor 0805 50V X7R
Kondenzátor	C2	47nF	1	Kondenzátor 0805 50V X7R
Kondenzátor	C4	4,7nF	1	Kondenzátor 0805 50V
Kondenzátor	C5	1pF	1	Kondenzátor 1206 50V NPO
Kondenzátor	C6	2,2pF	1	Kondenzátor 1206 50V
Kondenzátor	C7	3,9pF	1	Kondenzátor 1206 50V
Kondenzátor	C9 C22	47uF	2	Kondenzátor SKR 35V (5,2x12 RM2,5)
Kondenzátor	C10	100uF	1	Kondenzátor B41 ELAX 25V
Kondenzátor	C14 C18	330uF	2	Kondenzátor SKR 10V (6,3x11 RM2,5)
Kondenzátor	C19	100uF	1	Kondenzátor SKR 35V (6,3x11 RM2,5)
Kondenzátor	C20 C21	100nF	2	Kondenzátor 1206 50V X7R
Kondenzátor	C23 C26 C28	22uF	3	Kondenzátor 1210 25V GRM32ER61E226KE15L
Kondenzátor	C29	1uF	1	Kondenzátor 0805 25V
Kondenzátor	C30	4,7uF	1	Kondenzátor 1206 16V X5R
Rezistor	R5	1GΩ	1	Rezistor 3WK68006B /J 1W
Rezistor	R6	100MΩ	1	Rezistor 3WK68006B /J 1W
Rezistor	R7	10MΩ	1	Rezistor metal. 0207 /F 0,6W

Typ součástky	Označení	Hodnota	Množství	Specifikace
Rezistor	R8	750k Ω	1	Rezistor 1206 /B 0,25W TK25
Rezistor	R9	470k Ω	1	Rezistor 0805 /F 125mW
Rezistor	R10	270k Ω	1	Rezistor 0805 /F 125mW
Rezistor	R11	100k Ω	1	Rezistor 1206 /B 0,25mW TK50
Rezistor	R12 R21	10k Ω	2	Rezistor 0805 /F 125mW
Rezistor	R13 R16	47R Ω	2	Rezistor 0805 /F 125mW
Rezistor	R14 R15	1M Ω	2	Rezistor 0805 /F 125mW
Rezistor	R17 R18 R22 R23 R24	1k Ω	5	Rezistor 0805 /F 125mW
Rezistor	R19	10k Ω	1	Rezistor metalizovaný 0207 /F 0,6W
Rezistor	R20	220R Ω	1	Rezistor 0805 /F 125mW
Proměnný rezistor	R1		1	Trimr 64Y 50K
Proměnný rezistor	R2 R3		2	Trimr 64Y 200K
Proměnný rezistor	R4		1	Trimr 64Y 100K
Dioda	V1 V2 V3 V4		4	Dioda CD4148W (0805)
Indukčnost	L1 L2 L3 L4	33uH	4	Tlumivka SMCC (500mA 0,92R)
Tranzistor	T1		1	Bipolární tranzistor BC807-25 (SOT23)
Tranzistor	T2 T3		2	JFET tranzistor BF545C (SOT23)
Relé	K1 K2		2	Relé GM RELES1A 120 000
Optočlen	U1		1	Optočlen HFBR-1521
Optočlen	U2		1	Optočlen HFBR-2521

Typ součástky	Označení	Množství	Specifikace
Integrovaný obvod	U3 U4	2	Polovodičové relé CPC1004N (SOIC 4)
Integrovaný obvod	N1	1	Operační zesilovač TLC271ACD (SO8)
Integrovaný obvod	D1	1	Mikrokontrolér C8051F352 (QFP32) 9x9
Integrovaný obvod	N2	1	Měnič napětí TRACO TEN 3-1221
Integrovaný obvod	N3	1	Stabilizátor napětí L78L12ACZ (TO92)
Integrovaný obvod	N4	1	Stabilizátor napětí LT1086CT-3,3*PBF (TO220)
Konektor	X1 X2	2	Konektor S1G20 (přímý, 1pin)
Konektor	X4	1	Konektor CAN 9 V 90 (09 68 163 5813)
Konektor	X5	1	Konektor AMP 7-215079-6 (6p do DPS Z)